

**DANIELA SOLEDAD TAPIA SOLANO**

**Modelo de Comportamento de Peixes no  
Trecho a Jusante da Usina Hidrelétrica de Três  
Marias**

**Dissertação de Mestrado**  
Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, Outubro de 2017

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Daniela Soledad Tapia Solano

MODELO DE COMPORTAMENTO DE PEIXES NO TRECHO A JUSANTE DA USINA  
HIDRELÉTRICA DE TRÊS MARIAS.

BELO HORIZONTE

2017

DANIELA SOLEDAD TAPIA SOLANO

MODELO DE COMPORTAMENTO DE PEIXES NO TRECHO A JUSANTE DA USINA  
HIDRELÉTRICA DE TRÊS MARIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito Parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos  
Orientadora

BELO HORIZONTE

2017

S684m Solano, Daniela Soledad Tapia  
Modelo de comportamento de peixes no trecho a jusante da usina hidrelétrica de Três Marias. / Daniela Soledad Tapia Solano. -- Belo Horizonte, 2017.  
150 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2016.

Orientador: Profª Drª Hersília de Andrade e Santos.

#### Bibliografia

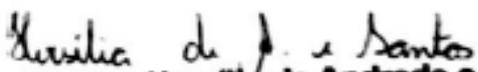
1. Fluidodinâmica Computacional. 2. Hidrodinâmica. 3. Comunidades de Peixes. I. Santos, Hersília de Andrade e. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 627

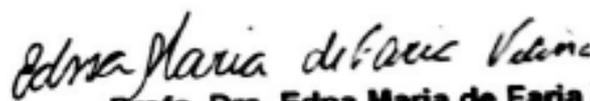
**DANIELA SOLEDAD TAPIA SOLANO**

**MODELO DE COMPORTAMENTO DE PEIXES NO TRECHO A  
JUSANTE DA USINA HIDRELÉTRICA DE TRÊS MARIAS**

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

  
**Profa. Dra. Hersília de Andrade e Santos**  
Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

  
**Profa. Dra. Edna Maria de Faria Viana**  
Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG

  
**Dr. Fabio Mineo Suzuki**  
Consultor Ambiental – Pisces, Consultoria e Serviços Ambientais

Belo Horizonte, 30 de novembro de 2016

## **DEDICATORIA**

Este trabalho está dedicado a minha família, esposo e a minha amada filha Clara, por serem meus grandes inspiradores na vida.

A minha orientadora Hersilia, que foi um suporte enorme e apoio constante para a conclusão de este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por me dar a oportunidade de viver essa experiência enriquecedora na minha vida, aprender novos conhecimentos e ter conhecido pessoas especiais.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG por ter sido uma instituição que possibilitou a oportunidade do desenvolvimento do trabalho de Mestrado, com suporte de infraestrutura, professores qualificados e ensino de qualidade.

Agradeço à Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG por ter ofertado apoio financeiro através da Universidade de Lavras, a qual também sou muito grata.

Agradeço ao Diretor Geral do CEFET MG, Professor Flávio dos Santos, por ter me aceitado no curso de Mestrado, dando a possibilidade de ser aluna regular do curso.

Agradeço enormemente a minha orientadora e amiga, professora Hersília Andrade e Santos pela oportunidade de trabalharmos juntas nesse projeto desafiador, compartilhamos muita dedicação, troca de ideias, experiências vividas neste momento importante que ambas vivemos e ainda por sua entrega para o desenvolvimento deste trabalho, onde ambas passamos horas tentando superar cada problema que surgia e que cada passo era uma vitória.

Agradeço a Fabio Suzuki, por estar sempre disponível em aclarar nossas dúvidas com respeito aos dados biológicos, seja por e-mails ou conferencia online, sua participação foi fundamental para alcançarmos nossos objetivos.

Agradeço a todos meus colegas que participaram desta experiência no Mestrado.

Agradeço a minha família, por todo seu amor, respeito e compreensão durante esse tempo e especialmente a minha filha e meu marido, por ser meu parceiro de curso e eterno amigo.

*“Queda prohibido no sonreír a los problemas, no luchar por lo que quieres, abandonarlo  
todo por miedo, no convertir en realidad tus sueños”*

Pablo Neruda

## RESUMO

A simulação numérica tridimensional no estudo de escoamentos multifásicos utilizando a Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD) é uma ferramenta importante de forma a conhecer as características do escoamento em áreas de Usinas Hidrelétricas. Por sua vez, eventos de mortalidade de peixes em locais próximos a Usinas Hidrelétricas são frequentes e estão relacionados a atração de cardumes a áreas como canal de fuga. O Brasil é um dos países com o potencial hidrelétrico mais representativo no mundo, portanto, os empreendimentos hidrelétricos formam parte importante para geração de eletricidade no país. O objetivo deste trabalho foi combinar informações de um modelo hidrodinâmico tridimensional com informações biológicas, coletadas através de telemetria acústica, gerando um modelo de previsão de comportamento das espécies de peixes no trecho a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias, em relação as variáveis hidráulicas. Gerou-se uma malha computacional multifásica (ar-água), do tipo não ortogonal estruturada para o trecho em questão. Em seguida, o modelo número do escoamento foi resolvido pelo software comercial “Ansys” utilizando modelo de turbulência  $k-\epsilon$  e o modelo VOF (Volume of Fluid) para definir a posição da linha d’água. Os resultados hidrodinâmicos do modelo foram combinados com informações de posicionamento duas espécies de peixes bastante comuns neste canal de fuga: *Prochilodus argentus* (curimatã) e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo). Para isto, foram feitas correções de posicionamento do sistema de coordenadas tanto do modelo hidrodinâmico como do sistema de monitoramento dos peixes. Por fim, foi desenvolvido um procedimento para cruzamento das informações no software Tecplot. Os resultados indicam diferentes preferências com respeito as variáveis hidráulicas, durante os meses de novembro e dezembro, para ambas as espécies. Assim, a principal contribuição deste trabalho é o método para a combinação de dados hidráulicos e biológicos para o estudo comportamental dos peixes em canal de fuga. Compreender os padrões de movimentos das espécies, fornece recursos para reduzir os impactos à ictiofauna e espera que este trabalho forneça subsídios para o aprimoramento do modelo de previsão de comportamento de peixes em Três Marias.

Palavras-Chave: Comportamento de peixes. Dinâmica Computacional de Fluidos. Hidroeletricidade.

## ABSTRACT

The three dimensional numerical simulation with multiphase approaches applying Computational Fluid Dynamics (CFD) is an important tool order to understand the flow around the Hydroelectric Power Plants. On the other hand, events of fish mortality near to Hydroelectric Power Plants are frequent and e related to schools attraction in areas such as tailraces. Brazil is one of the countries with the most representative hydroelectric potential in the world. Therefore, hydroelectric projects are an important part of electricity generation in the country. The objective of this work is to combine information from a three dimensional hydrodynamic model with biological information collected through acoustic telemetry, generating a prediction model of behavior of the fish species in the stretch downstream of the Três Marias Hydroelectric Plant, in relation to the hydraulic variables.

An structured mesh represented the domain and the commercial software Ansys solved the hydrodynamic model that had turbulence model k- $\epsilon$  and VOF (Volume of Fluid) to track the free-surface. This work developed the method to combine flow information to fish position in tailrace. The correction in GIS (Geographic Information System) of hydrodynamic model and fish tracking as well as the withdraw of hydraulic variables visited by fishes in Tecplot software were steps of developed method. The hydraulic results combined to tracking information of two common fish species in this tailrace (*Prochilodus argentus* - common name: curimatã e *Pimelodus maculatus*- common name: mandi amarelo) indicated different preferences for hydraulic variables in November and December 2011 for both species. Then, main contribution of this work is the combination method for hydraulic and biological data for behavior studies of fish in tailraces. The understanding of fish movement provides subsidies for reduction of impacts on fish fauna and we hope this work stands future steps in prevision model of fish behavior in Três Marias dam.

Key words: Fish behavior. Computational Dynamics of Fluids, Hydroelectricity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Hidrelétrica de Itaipu. ....	25
Figura 2 - Usina Hidrelétrica de Três Marias .....	26
Figura 3 - Oferta de Energia no Brasil .....	27
Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira.....	28
Figura 5 - Volume de controle associado ao vértice p da malha computacional. ....	37
Figura 6 - Malha Ortogonal .....	44
Figura 7 - Malha Não Ortogonal adaptada a um cilindro.....	44
Figura 8 - Bloco de uma malha estruturada 3D.....	45
Figura 9 - Exemplo de uma malha não estruturada, onde atravessam 2 tubos.....	46
Figura 10 - Exemplos dos principais tipos de etiquetas eletrônicas ativas.....	49
Figura 11 - Método utilizado através da Telemetria Acústica.....	50
Figura 12 - Sistema de Medição de Telemetria acústica dentro da água .....	51
Figura 13 - Materiais utilizados para realização de amostras através da Telemetria Acústica	52
Figura 14 - Imagem Satélite do trecho a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias. ....	53
Figura 15 - Canal de Fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias. ....	54
Figura 16 – Localização do Reservatório de Três Marias na Bacia do Rio São Francisco. ....	55
Figura 17 – Estruturas hidráulicas da Usina hidrelétrica de Três Marias.....	56
Figura 18 - ADCP, acoplado ao barco para levantamento dos dados de Batimetria.....	57
Figura 19 - GPS colocado ao lado do ADCP no barco. ....	57
Figura 20 - GPS localizado na margem esquerda do rio. ....	58
Figura 21 - Batimetria do rio, representada no programa TECPLOT. ....	59
Figura 22 - Geometria do Canal de Fuga da Usina com turbinas em funcionamento em vermelho. ....	60
Figura 23 - Plano e conectores do rio, no programa GRIDGEN.....	61
Figura 24 – Maior visualização dos conectores do rio e o plano. ....	61
Figura 25 - Domínios da malha do rio.....	62
Figura 26 - Plano de projeção do rio, topografia do rio (parte de baixo).....	62
Figura 27 - Blocos da geometria do rio. ....	63
Figura 28 - União da malha do rio com a malha do canal de fuga.....	63
Figura 29 - Blocos da malha do canal de fuga. ....	64
Figura 30 - Geometrias unificadas criando o Modelo de Estudo .....	65
Figura 31 - Malha do canal de Fuga após refinamento final.....	65
Figura 32 - Malha do canal de Fuga após refinamento do Fator Y plus. ....	67
Figura 33 - Razão de Aspecto. ....	68
Figura 34 - Razão de Aspecto da Malha do Canal de Fuga .....	68
Figura 35 - Escala e gama de valores para o Skewness (Indicador da qualidade da malha gerada). ....	70
Figura 36 – Exemplo do Índice de Skewness da malha do canal de fuga. ....	70
Figura 37 - Quantidade de peixes registrados através de Telemetria acústica. ....	71
Figura 38 - Nível de vazões das Turbinas e Vertedouro da represa de Três Marias. ....	72
Figura 39 – Condições de contorno do canal de fuga.....	73
Figura 40 – Malha do Canal de Fuga no programa FLUENT.....	76
Figura 41 – Malha do Canal de Fuga com o primeiro bloco do rio. ....	77
Figura 42 - Posicionamento de Hidrofones, nas medições realizadas a traves da batimetria do rio.....	79

Figura 43 - Posicionamento de Hidrofonos, nas medições realizadas através de telemetria acústica. ....	80
Figura 44 - Exemplo do Peixe código 3322, tomando em consideração os dados do Peixe medidos através da Telemetria acústica. ....	82
Figura 45 - Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes .....	82
Figura 46 - Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes .....	83
Figura 47 - Dados de Longitude máxima (x) e Latitude mínima (y) do total dos 16 Peixes subtraindo os valores de Longitude máxima (x) e Latitude mínima (y) dos dados Hidráulicos correspondentes ao Canal de Fuga, entregando o valor Final corrigido de ambos dados.....	83
Figura 48 - Posicionamento do Peixe, corrigido. ....	83
Figura 49 - Dados Hidrodinâmicos e Biológicos interpolados, antes da correção de coordenadas dos dados biológicos.....	84
Figura 50 - Dados Hidrodinâmicos e Biológicos interpolados, após a correção de coordenadas dos dados biológicos.....	85
Figura 51 - Subtração dos dados de posicionamento do Hidrofone 10 e os dados de coordenadas de longitude e latitude da batimetria do rio: .....	86
Figura 52 - Subtração dos dados: Total subtração posicionamento Hidrofone 10 e batimetria do rio, subtraindo os valores do Total da subtração de dados Biológicos e Hidrodinamicos: .....	86
Figura 53 - Somatória dos dados: Total subtração posicionamento Hidrofone 10 e batimetria do rio com o total da subtração dos dados biológicos e hidrodinâmicos, mais os dados da correção dos Hidrofonos.....	86
Figura 54 - Posicionamento do Hidrofone 10 perto do canal de fuga. Os dados foram visualizados no programa TECPLOT 360.....	87
Figura 55 - Correção de coordenada “z” nos dados biológicos, correspondente a cada peixe. 87	87
Figura 56 - Canal de fuga no programa TECPLOT 360. ....	88
Figura 57 - Posicionamento do Peixe Prochilodus argenteus (curimatã) código 3322 perto do Canal de Fuga da Central Hidrelétrica de Três Marias.....	89
Figura 58 - Posicionamento do Peixe Pimelodus maculatus (mandi amarelo) código 5296 perto do Canal de Fuga da Central Hidrelétrica de Três Marias. ....	89
Figura 59 - Observação das variáveis exportadas no programa TECPLOT 360.....	90
Figura 60 - Interpolação dos dados no programa TECPLOT 360.....	91
Figura 61 - Dados interpolados e observação das variáveis estudadas, no programa TECPLOT 360 .....	92
Figura 62 - Dados exportados para o formato Excel desde o programa TECPLOT 360 .....	93
Figura 63 - Arquivo no formato (dat), importado para o programa Excel 2016. ....	94
Figura 64 - Opções para importação do arquivo “dat”. (Delimitado). ....	94
Figura 65 - Opções para importação do arquivo “dat”. Delimitador de dados (Espaço) .....	95
Figura 66 - Opções para importação do arquivo “dat”. Delimitador de dados (Espaço) .....	96
Figura 67 - Dados importados do programa TECPLOT 360-2014 no programa Excel. Identificação das variáveis para cada coluna.....	97
Figura 68 - Dados importados do programa TECPLOT 360-2014 no programa Excel. Seleção dos dados do formato “científico”, para o formato “número” (utilizando só 2 decimais).....	97
Figura 69 - Exemplo dos dados filtrados do peixe 3322 no mês de novembro, selecionando o eixo “x”.....	98
Figura 70 - Exemplo das variáveis de velocidade do mês de novembro e dezembro para o peixe 3322, na planilha do programa “Statistica” na opção “Anova”.....	100

Figura 71 - Seleção das variáveis correspondentes ao peixe 3322 no programa “Statística”, depois da opção “one way anova” .....	101
Figura 72 - Seleção da aba “more results” no programa “Statística”.....	101
Figura 73 - Seleção da opção “Duncan” no programa “Statística”.....	102
Figura 74 - Resultado dos valores “Duncan” para as duas variáveis de velocidade no mês de novembro e dezembro do peixe 3322, no programa “Statística”. .....	102
Figura 75 - Opção “Graphs/2D/Box plot” no programa “Statística”, para o teste Duncan....	103
Figura 76 - Opções selecionadas na aba “Advance” no programa “Statística”, para geração do gráfico, correspondente ao teste Duncan. ....	104
Figura 77 - Gráfico comparando as variáveis de velocidade do mês de novembro e dezembro, correspondente ao peixe 3322, do teste Duncan, no programa “Statística”. .....	104
Figura 78 - Gráfico de convergência de vazão mássica no setor de saída da malha de estudo .....	106
Figura 79 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Velocidade do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro. ....	107
Figura 80 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Vorticidade do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro. ....	108
Figura 81 - Gráfico comparativo da variável Energia Turbulenta Cinética do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro. ....	109
Figura 82 - Gráfico comparativo da variável Intensidade Turbulenta do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro. ....	110
Figura 83 - Gráfico comparativo da variável Taxa de dissipação de Energia do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro. ....	111
Figura 84 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da deformação Hidráulica do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro. ....	112
Figura 85 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Velocidade do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro. ....	113
Figura 86 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Vorticidade do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro. ....	114
Figura 87 - Gráfico comparativo da variável Energia Turbulenta Cinética do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro. ....	115
Figura 88 - Gráfico comparativo da variável Intensidade Turbulenta do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro. ....	116
Figura 89 - Gráfico comparativo da variável Taxa de dissipação de Energia do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro. ....	117
Figura 90 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da deformação Hidráulica do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro .....	118
Figura 91 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Velocidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro. ....	119
Figura 92 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Vorticidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro. ....	120
Figura 93 - Gráfico comparativo da variável “Energia Turbulenta Cinética” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro. ....	121
Figura 94 - Gráfico comparativo da variável “Intensidade Turbulenta” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro. ....	122
Figura 95 - Gráfico comparativo da variável “Taxa dissipação de energia” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro. ....	123
Figura 96 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da deformação hidráulica” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro. ....	124

Figura 97 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Velocidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.....	126
Figura 98 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Vorticidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.....	127
Figura 99 - Gráfico comparativo da variável “Energia Turbulenta Cinética” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.....	128
Figura 100 - Gráfico comparativo da variável “Intensidade Turbulenta” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.....	129
Figura 101 - Gráfico comparativo da variável “Taxa dissipação de energia” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.....	130
Figura 102 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da deformação hidráulica” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro. ....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de Elementos da Malha de Estudo, 2015. ....	66
Tabela 2 - Condições de Contorno da malha do Canal de Fuga.....	73
Tabela 3 - Características previas antes da simulação, 2016.....	74
Tabela 4 - Vazão das Turbinas, 2011. ....	75
Tabela 5 - Coordenadas geográficas dos Hidrofonos, nas medições de Batimetria do rio.....	79
Tabela 6 - Coordenadas geográficas e a posição na coluna d'água de cada hidrofone no canal de fuga.....	80
Tabela 7 - Diferença de coordenadas dos três hidrofonos, medidos através da batimetria do rio e a telemetria acústica. ....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ADCP- Acoustic Doppler Current Profiler
- ANA - Agência Nacional de Aguas
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- CEMIG- Companhia de Energia Elétrica de Minas Gerais
- CFD - Dinâmica Computacional de Fluidos
- CGH - Centrais Geradoras Hidrelétricas
- CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- IEA - Internacional Energy Agency
- MME - Ministério de Minas e Energia
- MTP- Mecanismos de Transposição de Peixes
- PCH - Pequenas Centrais Hidrelétricas
- PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos
- UHE - Usina Hidrelétrica de Energia
- VOF - Volume of Fluid

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
2.1 Objetivos da Pesquisa.....	22
2.2 Objetivo Geral .....	22
2.3 Objetivos Específicos .....	22
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
3.1 Hidroeletricidade no Brasil.....	23
3.1.1 A Hidroeletricidade .....	23
3.1.2. Estrutura Institucional do Setor Elétrico no Brasil.....	24
3.1.3. Usinas Hidrelétricas.....	24
3.1.4. Matriz Energética Nacional .....	27
3.2 Impactos ambientais provocados pelas hidrelétricas à ictiofauna.....	29
3.2.1 Impactos Ambientais .....	29
3.2.2 Impactos Hidrológicos.....	30
<b>3.3 MODELOS HIDRODINÂMICOS .....</b>	<b>33</b>
3.3.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) .....	33
3.3.2 Escoamentos Multifásicos .....	34
3.3.3 Método de Discretização .....	35
3.3.4 Método de Volumes Finitos .....	36
3.3.5 Equações parciais de Reynolds Navier-Stokes (RANS) .....	38
3.3.6 Modelo de Turbulência K épsilon (k-ε): .....	40
3.3.7 Número de Courant .....	42
3.3.8 Simulação Numérica Computacional .....	43
3.3.8.1 Malhas numéricas .....	43
3.3.9 Tipos de Softwares maiormente utilizados em Modelos Hidrodinâmicos.....	46
3.4 Monitoramento para avaliar comportamento de peixes .....	48
3.4.1 Técnicas de monitoramento de peixes.....	48
3.4.1.1 Telemetria.....	48
3.4.1.2 Técnicas de monitoramento de peixes:.....	49
3.4.1.3 Telemetria Acústica.....	50
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
4.1 Área de Estudo .....	53
4.2. Geometria de Estudo .....	56
4.2.1. Geometria do Rio .....	56
4.2.2 Geometria do Canal de Fuga .....	59
4.3 Criação da malha de estudo .....	60
4.3.1 Malha do rio. ....	60
4.3.1.1 Intersecção do plano e a malha do rio .....	60

4.3.1.2 Geração dos conectores: .....	60
4.3.1.3 Geração dos domínios: .....	61
4.3.1.4 Plano de projeção com a topografia do rio .....	62
4.3.1.5 Geração dos blocos do rio: .....	62
4.4 Malha do canal de fuga.....	63
4.4.1 Adaptação da malha do canal de fuga: .....	63
4.4.2 Geração dos blocos:.....	64
4.5 Malha de modelo de estudo completo .....	64
4.5.1 Convergência entre a malha do rio com a malha do canal de fuga: .....	64
4.5.2 Definição da malha que será utilizada na simulação numérica computacional. ....	65
4.5.3 Refinamento e qualidade da Malha .....	66
4.5.4 Fator “Y plus”.....	66
4.5.5 Razão de Aspecto .....	67
4.5.6 Qualidade da Ortogonalidade .....	69
4.5.7 Definição do índice de Skewness. ....	69
4.5.8 Definição das condições de contorno: .....	70
4.6 Simulação numérica computacional do estudo .....	74
4.7 Análise de dados Biológicos .....	78
4.7.1 Seleção dos peixes .....	78
4.7.2 Correção de coordenadas .....	78
4.7.2.1 Dados da Batimetria do Rio e Dados de Telemetria Acústica: .....	78
4.7.2.2 Identificação dos Hidrofonos:.....	79
4.7.2.3 Ajuste final Longitude (x) e Latitude (y) dos dados Biológicos .....	82
4.7.2.4 Ajuste dos dados de Altitude (Z) dos dados Biológicos.....	85
4.8 Obtenção dos dados hidrodinâmicos junto com os dados biológicos. ....	88
4.9 Obtenção dos resultados extraídos do software “STATISTICA”. ....	99
4.9.1 Teste de Normalidade .....	99
4.9.2 Teste de Duncan .....	99
4.9.2.1 Comparação do mesmo peixe no mês de Novembro e Dezembro. ....	99
4.9.2.2 Comparação entre ambos peixes, por mês de forma independente. ....	105
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>106</b>
5.1 Convergência da simulação numérica computacional.....	106
5.2 Comparação dos dados dos peixes extraídos no software “STATISTICA” .....	107
5.2.1 Teste de Normalidade .....	107
5.2.2 Teste de Duncan: Comparação das variáveis hidráulicas por peixe no mês de novembro e dezembro. ....	107
5.2.2.1 Resultados da espécie de peixe Prochilodus argenteus (curimatã), comparativo entre os meses de novembro e dezembro. ....	107
5.2.2.1.1 Variável Hidráulica “Magnitude da Velocidade”.....	107
5.2.2.1.2 Variável Hidráulica “Magnitude da Vorticidade”. ....	108
5.2.2.1.3 Variável Hidráulica “Energia Turbulenta Cinética”.....	108
5.2.2.1.4 Variável Hidráulica “Intensidade Turbulenta”. ....	109
5.2.2.1.5 Variável Hidráulica “Taxa de dissipação de Energia”. ....	110
5.2.2.1.6 Variável Hidráulica “Magnitude da deformação”. ....	111
5.2.2.2 Resultados gráficos da espécie de peixe Pimelodus maculatus (mandi amarelo) código 5296, correspondente ao mês de novembro e dezembro. ....	112
5.2.2.2.1 Variável Hidráulica “Magnitude da Velocidade”.....	112
5.2.2.2.2 Variável Hidráulica “Magnitude da Vorticidade” .....	113

5.2.2.2.3 Variável Hidráulica “Energia Turbulenta Cinética”.....	114
5.2.2.2.4 Variável Hidráulica “Intensidade Turbulenta” .....	115
5.2.2.2.5 Variável Hidráulica “Taxa de dissipação de Energia” .....	116
5.2.2.2.6 Variável Hidráulica “Magnitude da deformação” .....	117
5.2.3 Teste de Duncan: Comparação das variáveis hidráulicas entre as diferentes espécies de peixes por mês.....	118
5.2.3.1 Resultados gráficos comparativos entre as espécies de Peixe <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296, correspondente ao mês de novembro. ....	118
5.2.3.1.1 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Velocidade” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	119
5.2.3.1.2 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Vorticidade” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	120
5.2.3.1.3 Comparação da variável hidráulica “Energia Turbulenta Cinética” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	121
5.2.3.1.4 Comparação da variável hidráulica “Intensidade Turbulenta” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	122
5.2.3.1.5 Comparação da variável hidráulica “Taxa dissipação de Energia” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	122
5.2.3.1.6 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da deformação” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	124
5.2.3.2 Resultados gráficos comparativos entre as espécies de Peixe <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296, correspondente ao mês de dezembro.....	125
5.2.3.2.1 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Velocidade” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	125
5.2.3.2.2 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Vorticidade” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	127
5.2.3.2.3 Comparação da variável hidráulica “Energia Turbulenta Cinética” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	128
5.2.3.2.4 Comparação da variável hidráulica “Intensidade Turbulenta” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	129
5.2.3.2.5 Comparação da variável hidráulica “Taxa dissipação de Energia” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	130
5.2.3.2.6 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da deformação” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes <i>Prochilodus argenteus</i> (curimatã) código 3322 e <i>Pimelodus maculatus</i> (mandi amarelo) código 5296. ....	131

<b>6 DISCUSSÃO .....</b>	<b>132</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>136</b>
<b>8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>138</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água sempre tem sido um elemento abundante e importante para sobrevivência e estima-se que seu volume mundial seja de aproximadamente 1,36 bilhões de Km<sup>3</sup>. Porém, há algum tempo, vem sendo um recurso escasso. Um exemplo que reflete a redução da disponibilidade de água está na participação desta no cenário de geração de energia elétrica. Segundo o relatório publicado pela Agência de Energia Elétrica em 2008, entre os anos 1973 e 2006 a participação da força das águas na produção total de energia no mundo passou de 2,2% para apenas 1,8%. No mesmo período a matriz da energia elétrica sofreu recessão acentuada de 21% para 16%, sendo a participação da força hidráulica inferior à do gás natural e o carvão. Pode se observar então que, a participação das águas na matriz energética a nível mundial é pouco significativa e na matriz da energia elétrica tem sido decrescente. Ressalta-se que apenas dois lugares no mundo tiveram aumento na oferta de energia elétrica nos últimos 30 anos: China e Brasil, segundo dados do relatório do Atlas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008).

O Brasil conta com uma oferta interna de energia hidráulica que atende 12,5% da matriz energética nacional, cujo valor correspondeu a 570,0 TWh em 2013 (aumento de 3,2% em relação a 2012). Considerando apenas a energia elétrica, a fonte hidráulica no país, em 2013 representou 70,6%, se consolidando como a maior produtora de eletricidade, segundo o Balanço Energético Nacional, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2014).

Brasil é um dos países com potencial hidrelétrico mais representativo no mundo, estima-se que o parque gerador de energia elétrica brasileiro em 2030 terá uma potência instalada de 210 e 250 mil MW, incremento considerável comparado com os atuais, de 120 a 160 mil MW (BRASIL, 2014). Por tanto, as hidrelétricas são importantes fontes de energia elétrica para o Brasil e serão sempre consideradas em qualquer cenário, ainda que condicionadas pelo transporte hidroviário, exigências ambientais e fontes alternativas de geração de energia (BRASIL, 2006).

A importância que possui a energia em geral no mundo, determina um desenvolvimento social e econômico, disponibilizando um suporte térmico, mecânico e elétrico a todas as atividades humanas (ANEEL, 2008).

Uma das principais bacias hidrográficas do Brasil que gera significativa energia hidrelétrica é a bacia do rio São Francisco, a qual possui um potencial instalado de energia hidrelétrica superior a 10.473MW, principalmente distribuídos entre as Usinas de Três Marias, Queimado, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó. Destaca-se o reservatório de Três Marias por ter um papel primordial na regularização das vazões do São Francisco. Esta bacia é muito rica em recursos hídricos, que são utilizados também para irrigação, pesca e aquicultura, o que implica uma adequada gestão (ANA, 2015).

Em geral, quando construídas, as hidrelétricas alteram o ambiente aquático, ocasionando modificações no regime hidrológico, provocando variabilidade na vazão dos rios e comprometendo o hábitat natural da ictiofauna (SAMPAIO, 2013). Desta forma, o ecossistema aquático é alterado e a ictiofauna local sofre sérios impactos (BARLETTA *et al.*, 2010). Supersaturação gasosa devido a introdução de gás atmosférico gerado pelas turbinas e o vertedouro (URBAN *et al.*, 2008), interceptação de rotas migratórias de peixes (DUGAN *et al.*, 2010) e um elevado nível de predação perto à barragem por causa da alta densidade de peixes que se juntam nas suas proximidades (AGOSTINHO *et al.*, 2007) são alguns exemplos do que pode ocorrer com peixes próximos às usinas hidrelétricas

Além disso, problemas apresentados no funcionamento das Usinas Hidrelétricas também podem gerar riscos na ictiofauna. A presença de cardumes próximos às barragens leva a entrada de peixes aos tubos de sucção, especificamente durante a parada das máquinas, para fazer a manutenção destas, causando mortandade de peixes, como: choque físico, diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido e supersaturação de oxigênio (ANDRADE *et al.*, 2012). As duas espécies de peixes maiormente afetadas pela Usina Hidrelétrica de Três Marias, são: *Prochilodus argentus* (curimatã) e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo).

Na tentativa de gestão dos ecossistemas aquáticos, os modelos hidrodinâmicos podem ser uma são uma ferramenta importante (TIRONI-SILVA *et al.*, 2014).

A realização de uma simulação numérica computacional em três dimensões fornece resultados de cenários que se aproximam à realidade e auxilia o entendimento dos fenômenos hidráulicos de mais difícil compreensão (SABBAGH-YAZDI *et al.*, 2007).

Uma técnica muito utilizada para simular escoamentos é a Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD). Muitos destes fenômenos são representados por equações parciais que não podem ser resolvidas analiticamente e, portanto, demandam um método de discretização, que aproxime essas equações diferenciais para um sistema de equações algébricas onde o problema poderá ser resolvido em um computador (FERZIGER & PERIC, 2002).

Um modelo matemático bastante empregado para simular o escoamento em um corpo d'água são as equações com médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations - RANS*) (ROSMAN, 2001). Estas equações são utilizadas quase exclusivamente nas abordagens de modelos em 3D e são vistas como o método padrão que tem dado resultados razoáveis. A modelagem de turbulência com duas equações utilizando o modelo *K épsilon* ( $k-\varepsilon$ ) também é muito usual (NIELSEN, 2011).

A utilização de um *software* é fundamental para realizar uma simulação numérica em um computador. Neste trabalho optou-se por utilizar o programa comercial *ANSYS FLUENT*.

A vantagem de utilizar um modelo matemático de simulação numérica computacional em estudos de impactos sobre a ictiofauna é que a simulação fornece informações espaciais do escoamento hidráulico, que após validação, possibilita o conhecimento das informações hidráulicas a que os peixes estão submetidos. Este modelo pode ser uma ferramenta que auxilia na minimização de impacto ambiental em regiões onde existem Usinas Hidrelétricas, entregando informações relevantes, para melhorias de operação no sistema hidráulico, nessas estruturas.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é fornecer um método que possibilite a combinação das informações de um modelo hidrodinâmico tridimensional com informações biológicas, coletadas através de telemetria acústica, gerando assim um modelo de comportamento das espécies de peixes no trecho de rio a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias, junto com o Canal de Fuga.

A Usina está situada no rio São Francisco, no município de Três Marias -Estado de Minas Gerais, a qual entrou em operação em 1962 e apresenta 6 unidades geradoras com potência instalada de 396 MW (CEMIG, 2015).

Este trabalho foi elaborado para a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) através do seu programa “Peixe Vivo” (2007), “que prevê a expansão e criação de medidas mais efetivas para a conservação da ictiofauna nas bacias hidrográficas onde estejam instaladas usinas da Empresa, favorecendo as comunidades que utilizam os recursos hídricos como fator de desenvolvimento” (CEMIG, 2015).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos da Pesquisa**

Pretende-se responder a seguinte pergunta:

Como que as ferramentas de modelagem numérica tridimensional do escoamento e o estudo de telemetria das espécies de peixes, quando interligadas, podem auxiliar a compreensão do estudo de comportamento da ictiofauna?

### **2.2 Objetivo Geral**

Combinar informações de um modelo hidrodinâmico tridimensional com informações biológicas realizadas por Suzuki (2014), gerando um modelo de comportamento das espécies de peixes no trecho a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias em relação as variáveis hidráulicas.

### **2.3 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos esse trabalho se propõe responder:

- a) Definir a malha da simulação numérica.
- b) Definir as condições de simulação numérica computacional para escoamentos multifásicos.
- c) Correlacionar os dados de simulação numérica e os dados biológicos.
- d) Analisar o comportamento de peixes e as variáveis hidráulicas no trecho a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Hidroeletricidade no Brasil**

##### **3.1.1 A Hidroeletricidade**

A energia hidrelétrica é produzida a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um curso d'água, combinando a utilização da vazão do rio, quantidade de água disponível em um determinado período de tempo, com os seus desníveis, sejam os naturalmente formados, como as quedas d'água, sejam os criados com a construção de barragens. Assim, a potência hidráulica disponível em determinado local de um rio é dada pelo produto da vazão, a altura existente entre o reservatório, a montante, e o sistema de descarga, a jusante da barragem, e a aceleração da gravidade (SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2006). A vazão de um rio, do ponto de vista energético, se dá nos pontos onde se pode conseguir uma maior queda.

A energia hidráulica provém da energia gravitacional. O sol e a força da gravidade condicionam a evaporação, a condensação e a precipitação da água sobre a superfície da Terra. A gravidade faz, ainda, a água fluir ao longo do leito do rio e este movimento contém energia cinética, que pode ser convertida em energia mecânica e depois em energia elétrica, nas centrais hidrelétricas. A hidroeletricidade é uma forma de energia renovável. Entre as múltiplas formas de produção de energia elétrica, a hidroeletricidade é, de longe, e há muito, a que apresenta a maior eficiência no processo de conversão. As perdas estão concentradas, basicamente, nos circuitos hidráulicos e no grupo turbina-geradora, que têm hoje, rendimento superior a 92% (BRASIL, 2007).

No Brasil a energia hidrelétrica, além de ser um fator histórico de desenvolvimento da economia nacional, cumpre um papel importante no desenvolvimento e integração de regiões que se encontram distantes dos grandes centros urbanos e industriais (BRASIL, 2007).

### 3.1.2. Estrutura Institucional do Setor Elétrico no Brasil

A continuação, o Atlas de Energia Elétrica explica de forma geral a estrutura institucional do setor elétrico brasileiro e as entidades responsáveis.

Em 2004, com a implantação do Novo Modelo do Setor Elétrico, o Governo Federal, por meio das leis no 10.847/2004 e no 10.848/2004, manteve a formulação de políticas para o setor de energia elétrica como atribuição do Poder Executivo federal, por meio do Ministério de Minas e Energia (MME) e com assessoramento do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e do Congresso Nacional. Os instrumentos legais criaram novos agentes. Um deles é a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao MME e cuja função é realizar os estudos necessários ao planejamento da expansão do sistema elétrico. Outro é a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que abriga a negociação da energia no mercado livre.

O Novo Modelo do Setor Elétrico preservou a Aneel, agência reguladora, e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), responsável por coordenar e supervisionar a operação centralizada do sistema interligado brasileiro. Para acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletroenergético em todo o território nacional, além de sugerir das ações necessárias, foi instituído o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), também ligado ao MME (ANEEL, 2008).

### 3.1.3. Usinas Hidrelétricas

Segundo CCEE (2015), uma usina hidrelétrica é composta, basicamente, de barragem, sistemas de captação e adução de água, uma casa de força e vertedouros. Cada um desses elementos demanda obras de construção e instalações que devem ser projetadas para um funcionamento que trabalhe de forma conjunta.

De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica, o Brasil conta com 4.461 empreendimentos em operação, totalizando 141.699.960 KW de potência instalada. Do total de empreendimentos em operação, 550 são CGH (Central geradora hidrelétrica); 338 EOL (Central geradora eólica); 457 PCH (Pequena central hidrelétrica); 37 UFV (Central geradora solar fotovoltaica); 203 UHE (Usina hidrelétrica); 2.874 UTE (Usina termelétrica); 2 UTN (Usina Termonuclear) (ANEEL, 2016).

Uma das primeiras hidrelétricas do mundo foi construída no final do século XIX, junto às quedas d'água das Cataratas do Niágara, na América do Norte. No mesmo período, o Brasil

construiu sua primeira hidrelétrica, em Diamantina, no estado de Minas Gerais, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha. Essa hidrelétrica possuía 0,5 megawatts (MW) de potência e uma linha de transmissão 2 km de extensão.

Cem anos depois, a potência instalada das usinas aumentou consideravelmente. Na China, a hidrelétrica de Três Gargantas, concluída em maio de 2006, é hoje a maior hidrelétrica do mundo, com uma capacidade de geração total de 22.500 MW, superando dessa forma a Hidrelétrica de Itaipu Binacional, a maior que era até então, com capacidade de 14.000 MW (FIGURA 1).

Figura 1 - Hidrelétrica de Itaipu.



Fonte: SOLANO, 2015.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) adota três classificações de Unidades geradoras de energia, segundo a sua potência instalada:

- a) Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH, entre 1 MW e 3 MW);
- b) Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH, entre 3 MW e 30 MW);
- c) Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30 MW).

O tamanho da usina também determina as dimensões da rede de transmissão que são necessárias para levar a energia até o centro de consumo. No caso das hidrelétricas, quanto maior a usina, mais distante ela tende a estar dos grandes centros urbanos, exigindo a construção de grandes linhas de transmissão em alta e extra alta tensão (de 230 kV a 750 kV) que, muitas vezes, cruzam o território de vários Estados (CCEE, 2015).

As PCHs e CGHs, instaladas junto a pequenas quedas d'água, no geral, abastecem pequenos centros consumidores, inclusive unidades industriais e comerciais individuais, e não necessitam de instalações tão extensas para o transporte da energia (CCEE, 2015).

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) ocupa a terceira posição entre as maiores geradoras do país, por meio de suas subsidiárias integrais controladas e coligadas de geração (CALLISTO *et al.*, 2014). A empresa tem participação em 105 usinas, das quais, 79 são hidrelétricas, 3 térmicas e 23 eólicas com capacidade total instalada de 11.838,98 GW (CEMIG, 2016a) e em 2014 teve início o projeto de uma Usina solar fotovoltaica (USF) Mineirão (Estádio Governador Magalhães Pinto) com potência instalada de 1,42Mwp (CEMIG, 2016) .

A Figura 2 apresenta a Usina Hidrelétrica de Três Marias, correspondente ao grupo de Usinas da CEMIG e na qual é focado este trabalho, está localizada no Município de Três Marias, estado de Minas Gerais, Brasil. Esta UHE teve seu início de construção em 1957 e começou a operar em 1962, contem 6 unidades geradoras e uma potência instalada de 398 MW (CEMIG, 2015).

Figura 2 - Usina Hidrelétrica de Três Marias



Fonte: CEMIG, 2015.

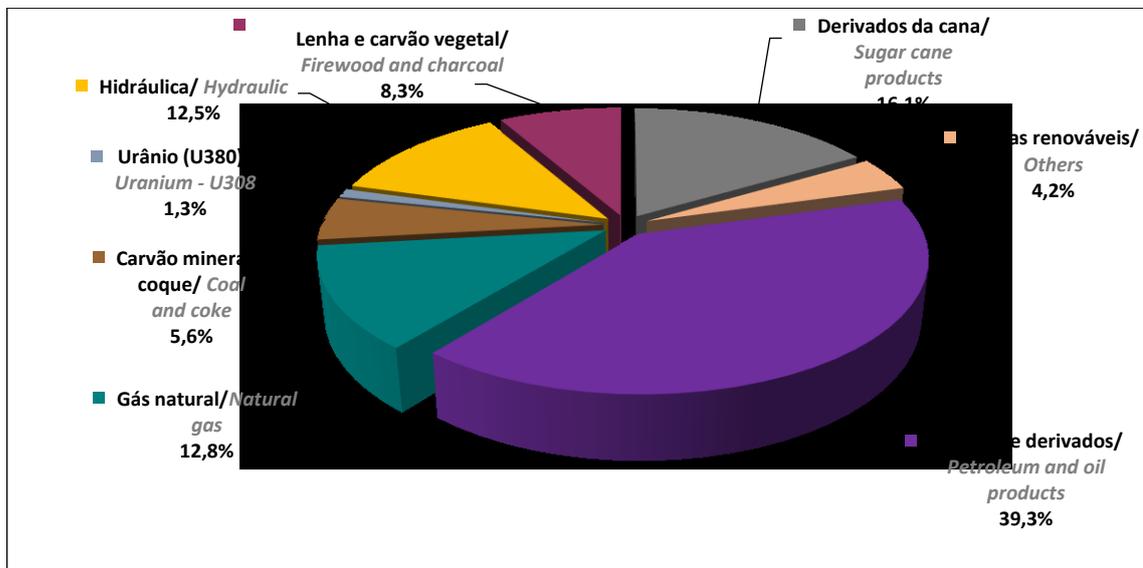
Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, estima-se que o parque gerador de energia elétrica brasileiro para o ano 2030 terá uma potência instalada de 210 e 250 mil MW, incremento considerável comparado com os atuais. Em termos quantitativos indicam como potencial hidrelétrico a aproveitar até 2030 o valor de 174.000 MW (BRASIL, 2007a). Por tanto as hidrelétricas são importantes fontes de energia para o Brasil e serão sempre consideradas em

qualquer cenário, ainda que condicionadas pelo transporte hidroviário, exigências ambientais e fontes alternativas de geração de energia (BRASIL, 2006).

### 3.1.4. Matriz Energética Nacional

Segundo o Balanço Energético Nacional, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2014). O Brasil conta com uma oferta interna de energia a partir de fonte hidráulica que atende 12,5% da matriz energética nacional, sendo ultrapassada apenas pelo petróleo e seus derivados (39,3%), derivados da cana de açúcar (16,1%) e Gás Natural (12,8%) (FIGURA 2).

Figura 3 - Oferta de Energia no Brasil



Legenda: Balanço Energético Nacional, EPE.

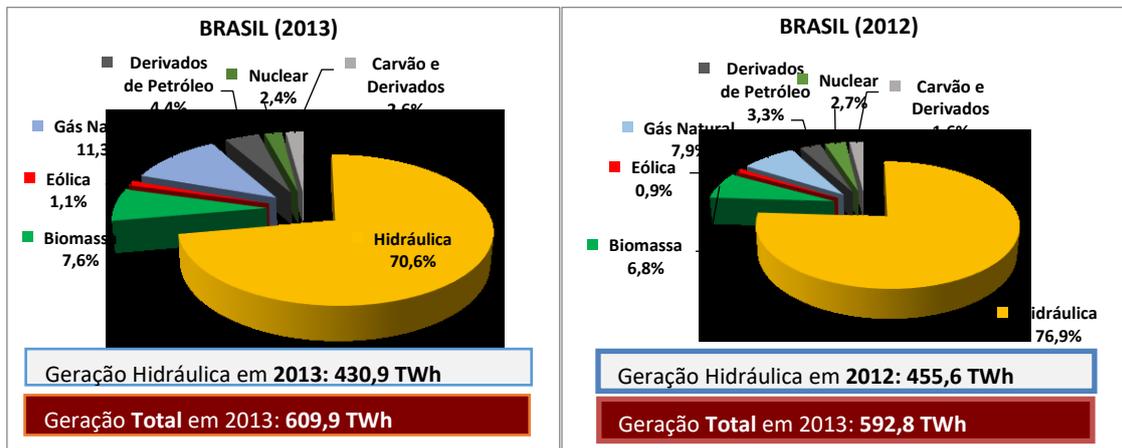
Fonte: BRASIL, 2014.

Totalizando uma oferta interna de energia elétrica em centrais de serviço público e autoprodutores de 570,0 TWh em 2013 (aumento de 3,2% em relação a 2012), a energia de fonte hidráulica produzida no país representou 70,6%, se consolidando como a maior produtora de eletricidade do país.

A principal fonte de geração de energia elétrica é hidráulica, embora tal fonte tenha apresentado uma redução de 5,9% na comparação com o ano anterior (2012). Importações líquidas de 39,9 TWh, somadas à geração nacional, asseguraram uma oferta interna de energia elétrica de 609,9 TWh, de 2,9% em 2013 superior a 2012 (BRASIL, 2014).

A Figura 4 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2013 em comparação com o ano 2012.

Figura 4 - Matriz Elétrica Brasileira



Legenda: Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional, EPE. (Imagem modificada pela autora no programa Excel para uma melhor visualização dos gráficos)

Fonte: BRASIL, 2014.

O potencial técnico de aproveitamento da energia hidráulica nacional se encontra entre os cinco maiores do mundo, Brasil tem 12% da água doce superficial do planeta. Este potencial elétrico é estimado em cerca de 260 GW, dos quais 40,5% estão localizados na Bacia Hidrográfica do Amazonas, para efeito de comparação, a Bacia do Paraná responde por 23%, a do Tocantins, por 10,6% e a do São Francisco, por 10%. Contudo, só um 63% do potencial foi inventariado. A Região Norte, em especial, tem um grande potencial ainda por explorar (BRASIL, 2014).

A pesar de constituir 10% do potencial hidrelétrico do país, a bacia do São Francisco, possui um potencial de energia hidrelétrica instalada superior a 10.473MW, não deixando de ser um valor pouco representativo. Esta potência está distribuída principalmente entre as Usinas de Três Marias, Queimado, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó. Destaca-se o reservatório de Três Marias por ter um papel primordial na regularização das vazões do São Francisco. Esta bacia é muito rica em recursos hídricos, que são utilizados também para irrigação, pesca e aquicultura, o que implica uma adequada gestão (ANA, 2015).

### **3.2 Impactos ambientais provocados pelas hidrelétricas à ictiofauna**

Particularmente para a geração de energia elétrica, a exploração desses recursos tem suscitado muitas polêmicas, principalmente com relação aos impactos socioambientais gerados. Existem leis que visam amortecer os impactos principalmente na ictiofauna, como por exemplo, a Lei 15.082 do Estado de Minas Gerais (BRASIL, 2004). Ela dispõe sobre rios de preservação permanente, entre eles, o rio São Francisco, no trecho que se inicia imediatamente a jusante da barragem hidrelétrica de Três Marias e vai até o ponto logo a jusante da cachoeira de Pirapora (Art. 5º), faz menção no seu artigo 2º “manter o equilíbrio ecológico e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos e marginais; proibindo também no seu artigo 3º “O exercício de atividade que ameace extinguir espécie da fauna aquática ou que possa colocar em risco o equilíbrio dos ecossistemas”.

#### **3.2.1 Impactos Ambientais**

A construção e operação de barragens nos rios podem causar impactos ambientais a curto, médio e longo prazo, a nível local, regional e global (DE LIMA, 2014).

Na literatura existem vários impactos causados pela construção de barragens, como por exemplo:

- a) A jusante: Alteração no regime hidrológico que passa a ter regime de seca e cheia aperiódico, portanto independente do regime pluviométrico da região e alterações na qualidade física e química da água. Consequências como alterações a jusante, pode ser observada logo após o fechamento da represa, como também muitos anos depois. Os organismos aquáticos e terrestres sofrem consequências imediatas das alterações do regime hidrológico (ESTEVES, 1998).
- b) A montante: Aumento da taxa de sedimentação a montante em seus afluentes; inundação de áreas florestais ou agrícolas, que podem causar alterações físicas e químicas no meio aquático (alterações do pH e surgimento do gás sulfídrico); alterações nas possíveis condições de reprodução das espécies aquáticas, devido por exemplos a destruição das lagoas marginais e alterações na qualidade física e química da água e profundas modificações na fauna ictiológica (ESTEVES, 1998).
- c) A jusante e a Montante: Migração de peixes bloqueada ou interrompida; qualidade da água melhorada ou comprometida; peixes nativos poderão morrer ou sofrer estresse

(COLLIER *et al.*, 2000). Situação do reservatório; interferência na migração, ciclo de vida e habitat de organismos aquáticos, incluindo peixes de importância comercial; aumento na ocorrência e severidade de doenças de água parada; perda de água irre recuperável através da evaporação do reservatório e subterrânea (VOROSMARTY *et al.*, 1997).

### 3.2.2 Impactos Hidrológicos

Estudos gerados por Poff & Zimmerman, (2010) relacionam uma hipótese de alterações hidrológicas a respostas ecológicas e a maior parte das alterações hidrológicas levantadas está relacionada a barragens. Naturalmente o regime hidrológico de um rio costuma variar com o regime de chuvas passando por períodos de secas e cheias, tanto para rios perenes quanto os intermitentes. A biota local desenvolveu adaptações para se adequar a estas alterações e precisa das variações no regime hidrológico para manter seus ciclos de vida.

Segundo Bunn & Arthington, (2002) a alteração de regimes de fluxo afeta a biodiversidade aquática em córregos e rios. Eles construíram quatro princípios que ilustram a influência de regimes de escoamento na biodiversidade aquática e examinam as consequências em função de cada um deles:

- 1) “A vazão é um dos principais fatores que determinam a forma física do habitat em cursos d’água, que por sua vez é um dos principais determinantes da composição biótica;
- 2) Espécies aquáticas desenvolveram estratégias de história de vida de cada espécie, principalmente em resposta direta aos regimes de vazão natural;
- 3) Manutenção dos padrões naturais de conectividade longitudinal e lateral é essencial para a viabilidade das populações de muitas espécies ribeirinhas;

Em geral, quando construídas, as hidrelétricas alteram os regimes de vazão dos rios, em termos de frequência, duração, e taxas de mudanças hidráulicas, além de criarem novos ambientes como o reservatório a montante do barramento (POFF *et al.*, 1997).

A vazão é um fator físico responsável pela disponibilidade de habitat físicos e composição de comunidades biológicas em rios, influenciando a história de vida de inúmeras espécies aquáticas em resposta à variabilidade natural. Diversas barragens retêm parte significativa da vazão afluente no reservatório ao longo do dia, permitindo a geração plena no período denominado horário de ponta. A vazão ambiental em grandes rios, com utilização intensa de barragens para produção de energia elétrica, expressa em hidrogramas<sup>1</sup> é um conceito chave para a gestão de bacias hidrográficas dentro de uma perspectiva ecossistêmica (CALLISTO, 2011).

O conhecimento de escoamentos onde existem centrais hidrelétricas, também é um ponto importante a considerar, Duarte, (2014) realizou um estudo no trecho a jusante do rio São Francisco, na Hidrelétrica de Três Marias, os resultados indicaram que o “escoamento próximo ao canal de fuga é bastante turbulento, com geração de grandes vórtices, além de sofrer influência de estruturas como uma parede localizada na margem direita do canal. Os valores absolutos de velocidades encontrados nas áreas próximas à UHE, cerca de 2 a 3 m/s, provam a existência de regiões passíveis de serem acessadas por espécies de peixes”. Sabe-se que a velocidade de 1m/s é suficiente para atrair peixes (TAGUCHI, 2011).

Segundo Barleta *et al.*, (2010) o regime hidrológico dos rios afeta a qualidade do hábitat e o funcionamento dos ecossistemas. O efeito mais visível sobre a ictiofauna nas barragens ocorre com respeito às espécies migratórias. Populações inteiras podem ser afetadas por processos de fragmentação no rio que podem ter o seu acesso aos hábitats de reprodução e criadouros bloqueados. Tais problemas levam a consequências genéticas graves, mais também o recrutamento (PETRERE, 1996).

A supersaturação gasosa devido a introdução de gás atmosférico gerado pelas turbinas e o vertedouro (URBAN *et. at.*, 2008), a grande energia introduzida por fluxos do vertedouro, principalmente dissipada no canal a jusante adjacente a bacia, introduz grandes quantidades de bolhas e cria ondas energéticas. Se bolhas chegam a atingir regiões profundas dentro da bacia, em imersão direta ou em transporte turbulento, elas podem dissolver o ar na água aumentando a concentração de gás dissolvido total (TDG) no canal de fuga. Uma elevada supersaturação

---

<sup>1</sup> Representação gráfica da vazão observada numa seção de um curso d'água em relação ao tempo de passagem da água pela seção (BARBOSA JÚNIOR, 2014).

(TDG) pode causar doença nos peixes pelas bolhas de ar, causando embolia gasosa, e se formar bolhas baixo a pele, boca, brânquias, aletas dos peixes, comprometendo sua saúde, como consequência de uma debilitação (POLITANO *et al.*, 2009). Também, a interceptação de rotas migratórias de espécies (DUGAN *et al.*, 2010) e um elevado nível de predação perto à barragem por causa da alta densidade de peixes que se juntam nas suas proximidades são alguns exemplos do que pode ocorrer com peixes próximos a usinas hidrelétricas (AGOSTINHO *et al.*, 2007).

A presença de cardumes próximos às barragens leva a entrada de peixes aos tubos de sucção, especificamente durante a parada das máquinas, para fazer a manutenção destas, causando mortandade de peixes, devido à redução do oxigênio dissolvido, do estresse do confinamento e das lesões físicas causadas pelo contato com outros peixes (ANDRADE *et al.*, 2012).

No ano de 2007 ocorreu um acidente considerável na Usina Hidrelétrica de Três Marias, pertencente à CEMIG, que gerou a mortandade de quase sete toneladas de peixes:

Um imenso cardume tentava subir o Rio São Francisco e se aproximou do vertedouro da barragem. De acordo com a polícia do meio ambiente, “com o fechamento das comportas, a usina parou de verter água, formando-se então um tanque, impedindo a saída do cardume da bacia de dissipação, ocasionando a mortandade por falta de oxigênio na água”, já que não havia a renovação desta. Cerca de duas toneladas de peixes morreram nesse tanque, cuja finalidade é diminuir a força da queda d'água do vertedouro, evitando danos à estrutura da usina. Segundo a CEMIG, assim que o problema foi identificado os vertedouros foram abertos de forma a aumentar a quantidade de água e interromper a mortandade. Porém os peixes seguiram para a área da turbina número seis, que estava parada em manutenção. Um problema técnico não permitiu que fosse ligada, o que acarretou na morte de mais 5,3 toneladas de peixes, provavelmente também por falta de oxigênio. (SÃO FRANCISCO, 2007)

### 3.3 Modelos Hidrodinâmicos

Os modelos numéricos hidrodinâmicos são ferramentas importantes para ajudar a gestão dos ecossistemas aquáticos, tanto marinhos como de água doce. Uma vez implementados os modelos hidrodinâmicos, depois de ser calibrados e validados, simulam uma resposta de um sistema em determinadas condições de contorno (TIRONI-SILVA *et al.*, 2014).

O enfoque do modelo hidrodinâmico, nesse trabalho, será direcionado ao estudo de escoamento em curso de água natural (rio).

#### 3.3.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

Segundo Ferziger & Peric, (2002), a Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD) é uma técnica de simular escoamentos. Muitos destes fenômenos são representados por equações parciais que não podem ser resolvidas analiticamente e, portanto, demandam um método de discretização, quer dizer, individualizar uma unidade contínua em unidades individuais (discretas), que aproxime essas equações diferenciais para um sistema de equações algébricas onde o problema poderá ser resolvido em um computador. As aproximações são aplicadas em pequenos domínios de espaço e/ou tempo, de modo que a solução numérica fornece resultados em locais discretos no tempo e no espaço. Os dados numéricos exatos vão depender da qualidade das ferramentas utilizadas e as precisões das soluções numéricas dependeram da qualidade da discretização utilizada.

A dinâmica de fluidos computacional pode ser aplicada em inúmeras atividades em métodos de projetos de engenharia.

A aplicação do CFD para análise de um problema de fluido pode ser dividida em (SALEH, 2002):

- 1) Equações matemáticas que descrevam o fluxo do fluido (geralmente o conjunto de equações diferenciais parciais).
- 2) Estas equações são discretizadas para produzir uma equação numérica análoga. Logo o domínio é dividido em pequenos elementos.

- 3) Condições iniciais e de contorno do problema específico, são utilizadas para resolver estas equações. O método de solução pode ser iterativo ou direto. Também, certos parâmetros de controle são aplicados para controlar a estabilidade, convergência e a precisão do método

Todos os códigos CFD possuem três elementos principais:

- 1) Um pré-processador, que é usado para inserir o problema da geometria, geração da malha, definição do parâmetro de escoamento e as condições de contorno para o código.
- 2) Um solucionador de escoamento, que é usado para resolver as equações que regem o fluxo sujeito às condições previstas. Os métodos mais utilizados são: Método de diferenças finitas; Método de elementos finitos; Método de volumes finitos.
- 3) Um pós-processador, que é utilizado para suavizar os dados e mostrar os resultados em formato gráfico e de uma forma fácil de ler (SALEH, 2002).

### 3.3.2 Escoamentos Multifásicos

Durante muito tempo, na engenharia assim como em diversas outras áreas, vem estudando a análise de escoamentos, tentando compreender e prever seu comportamento. Pessoas importantes da história, como Arquimedes há 300 anos antes de Cristo, realizou cálculos diferenciais para analisar escoamentos, em 1500 Leonardo da Vinci concluiu a equação da conservação de massa para escoamentos viscosos e unidimensionais, entre os anos 1600 e 1700 *Newton, Laplace e Euler* estudaram sobre esse tema, assim como também *Poisson e Stokes* em 1800 e em 1904 *Ludwig Prandtl* elaborou a teoria de camada limite, que descreve uma região de contato entre um fluido incompressível em movimento, relativamente a um sólido (PETRY, 2002).

O escoamento multifásico, é o escoamento simultâneo de diversas fases, como são: gás, líquido ou sólido, sendo o caso mais simples o escoamento bifásico, onde se encontram presentes dois estados da matéria (ROSA, 2012). Neste estudo se considerará a análise de duas fases, água - ar.

O escoamento multifásico é aquele que ocorre no processo de evaporação ou condensação dentro de uma partícula líquida onde é transformada em um gás ou vice-versa. Os fenômenos físicos que acontecem nestes tipos de escoamentos são um tanto complexos. Interfaces estão presentes como condição inicial específica, ou resultados de troca de fases através da evaporação, condensação, fusão, solidificação e rompimento, nestas interfaces a tensão superficial desempenha um papel importante (CHUNG, 2002). Existem diferenças nas características apresentadas pelas duas fases, a densidade provoca a separação das fases, escoando cada uma com uma velocidade distinta. Por exemplo o gás ao ter menor densidade que a água, escoando com maior velocidade em escoamento ascendente, e acontece o contrário com a água no escoamento descendente, sendo a fase líquida a que escoando com maior velocidade (NASCIMENTO, 2013).

A análise de escoamentos multifásicos, pode ser abordada de três formas, experimental, teórica e computacional. A abordagem experimental, não necessita de modelos, já que o escoamento é simulado pela própria natureza, o observador só observa e realiza medidas para o cálculo de intensidade dos eventos, dentro um laboratório. A segunda abordagem, utiliza hipóteses simples onde se consegue uma solução analítica do problema de estudo, este método teórico, captura características gerais do escoamento, como queda de pressão, mais não entrega detalhes das escalas do escoamento, nem informação específica, diferente da abordagem computacional que vem adquirindo bastante importância na área de escoamento multifásicos, já que ajuda na compreensão básica dos fenômenos, não necessariamente através de casos em laboratórios, mas este método se torna equivalente a um laboratório multifásico virtual, sendo útil em casos onde as técnicas experimentais e teóricas não conseguem definir soluções a problemas complexos (ROSA, 2012).

### **3.3.3 Método de Discretização**

Para começar a realizar um método numérico é preciso um modelo matemático, utilizando as equações diferenciais parciais e as condições de fronteira que governam o processo. Para isto, se deve escolher o modelo adequado dependendo do estudo, já que o que se pretende com o modelo matemático é a busca de uma solução aproximada de equações. Não existindo um modelo único aplicável a qualquer situação (GONÇALVES, 2007).

O modelo matemático está acompanhado de um método de discretização apropriado, o qual, aproxima as equações diferenciais em um sistema de equações algébricas, para as variáveis do problema analisado, elas serão obtidas em localizações discretas no tempo e no espaço. Para isto, existem alguns métodos, mencionados anteriormente: Métodos de Diferenças Finitas; Método de Elementos Finitos e o Método de Volumes Finitos, que será utilizado neste estudo. Cada método é apropriado para um determinado modelo de estudo. O Método mais antigo e dinâmico para geometrias simples é o de Diferenças Finitas ele é muito fácil de utilizar, só que se restringe a esse tipo de geometria e não é apropriado para geometrias complexas. O Método de Elementos Finitos é muito parecido ao método de Volumes Finitos. A vantagem deste método é que trabalha com geometrias arbitrárias, as malhas podem ser refinadas de forma simples em regiões de interesse, já que cada elemento pode ser dividido em vários. A desvantagem, é que é dividido com métodos que trabalham com malhas não estruturadas (GONÇALVES, 2007).

O Método de Volumes Finitos tem a característica de modelar mais de um fluido, como neste estudo se pretende avaliar água e ar, é o método idôneo para ser aplicado.

### **3.3.4 Método de Volumes Finitos**

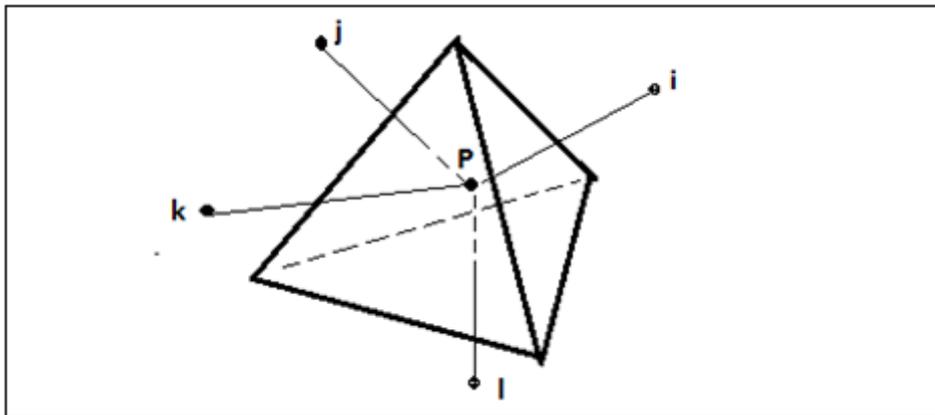
Este método permite fazer uma discretização e resolver numericamente equações diferenciais. Um exemplo, pode ser demonstrado em uma malha de discretização de espaço de fluido, ao redor de cada ponto da malha se constrói um volume de controle que não se sobrepõe com os outros pontos vizinhos, de modo que o volume total do fluido é igual à soma dos volumes finitos considerados. A equação diferencial que se pretende resolver se integra em cada volume de controle, o que resulta em uma versão discretizada dessa equação. Para realizar a integração se necessita especificar os perfis de variação da variável independente entre os pontos da malha, de forma a poder avaliar as integrais resultantes. A propriedade principal do sistema de equações discretizadas resultantes, é que a solução obtida, cumpre de forma exata as equações de conservação consideradas, independentemente do tamanho da malha. (NIÑO, 2002). Este método é atualmente o mais utilizado em CFD, já que ele pode resolver algumas das dificuldades que os outros métodos não conseguem (SALEH, 2002).

No modelo de volumes finitos, as propriedades em um volume determinado, mostra uma das fases ou várias fases, com relação aos valores da fração do volume, quer dizer, se a q-ésima fração de volume do fluido é representada como  $\alpha_q$ , por tanto, qualquer das seguintes situações são possíveis (GOMES *et al.*, 2009):

- a)  $\alpha_q = 0$ : O volume está vazio (do q-ésima fluido)
- b)  $\alpha_q = 1$ : O volume está repleto (do q-ésima fluido)
- c)  $0 < \alpha_q < 1$ : O volume está na interface entre o q-ésima fluido ou em um ou vários outros fluidos.

Se admite que o domínio do problema de estudo, encontra-se dividido em um conjunto de volumes de controle e cada um desses volumes  $p$  é limitado pelos planos mediadores de cada um dos segmentos de reta ( $p_i$ ), no qual, une  $p$  a cada vértice  $i$  vizinho, segundo Figura 5 (GONÇALVES, 2007).

Figura 5 - Volume de controle associado ao vértice  $p$  da malha computacional.



Fonte: GONÇALVES, 2007.

O método é adequado para qualquer tipo de malha que se deseje utilizar, inclusive para as que possuem geometrias complexas, a malha é definida apenas pelos limites de volumes de controle e não precisa estar relacionado a um sistema de coordenadas e os valores podem ser aproximados. Este método é simples de entender e programar, porem uma das desvantagens que apresenta, é que o método precisa de três níveis de aproximação: Uma interpolação, diferenciação e uma integração, para ser desenvolvido em 3D (FERZIGER; PERIC, 2002).

### 3.3.5 Equações parciais de *Reynolds Navier-Stokes (RANS)*

Um modelo matemático bastante empregado para simular o escoamento em um corpo d'água são as equações com médias de *Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations - RANS)* (ROSMAN, 2001).

Em problemas reais na área da engenharia, as características de tempo e espaço são muito amplas. Uma alternativa eficiente seria adotar a média temporal das equações de *Navier-Stokes*, porém resolver estas equações, requer determinar as particularidades de turbulência (COSTA, 2009):

As Equações de *Navier-Stokes*, deduzidas pelos autores C.L.M.H *Navier e Sir George Stokes*, são equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem, as quais entregam soluções para vários tipos de problemas de escoamentos viscoso (WHITE, 2011).

A Equação 1 de quantidade de movimento na sua estrutura completa é própria para qualquer tipo de fluido em movimento. Os três últimos termos que se encontram no lado direito ao final de cada equação não são lineares, por tanto, dificulta o estudo matemático de forma geral (WHITE, 2011).

$$\begin{aligned}
 \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\
 \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\
 \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde:

$\rho$  : densidade

$g$ : gravidade

$p$ : pressão;

$\tau$  : Tensão de cisalhamento

$u, v, w$ : componentes cartesianas das velocidades medias temporais (FILL,2011)

Porém para a Equação 3 ser aplicada é necessário integrar as tensões viscosas com o componente de velocidade, no caso, adotando o escoamento sem atrito  $\tau_{ij} = 0$ , como mostra a Equação de *Euler* para escoamento não viscoso (EQUAÇÃO 2):

$$\rho g - \nabla p = \rho \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Quando se trabalha com um fluido newtoniano, as tensões viscosas são equivalentes ao coeficiente de viscosidade e às taxas de deformação do elemento. Para escoamento incompressível tridimensional, se utiliza a Equação 3, onde  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Por tanto, a substituição na Equação 1, proporciona “a equação diferencial da quantidade de movimento para um fluido newtoniano com massa específica e viscosidade constantes”, equações conhecidas como *Navier-Stokes* para escoamento incompressível (EQUAÇÃO 4):

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Estas equações possuem quatro incógnitas:  $p, u, v, w$ , as quais deverão ser combinadas com a relação de continuidade incompressível (EQUAÇÃO 5), para assim, formar quatro equações com essas quatro incógnitas.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

As equações parciais de *Navier–Stokes* são utilizadas quase exclusivamente nas abordagens de modelos em 3D e são vistas como o método padrão que tem dado resultados razoáveis. A modelagem de turbulência com duas equações utilizando o modelo *K épsilon* ( $k-\varepsilon$ ), também é muito usual (NIELSEN, 2011).

### 3.3.6 Modelo de Turbulência *K épsilon* ( $k-\varepsilon$ ):

O fator de turbulência desempenha um papel importante em muitos processos de engenharia. Ainda é bastante caro (computacionalmente) realizar uma simulação numérica de escoamentos turbulentos. Os modelos de viscosidade turbulentos com base nas equações de *Reynolds de Navier-Stokes*, são comumente utilizados em códigos CFD. Um dos mais comuns é o modelo padrão ( $k-\varepsilon$ ) que tem sido usado desde o ano 1970 (KUZMIN & MIERKA, 2006).

A turbulência é um fenômeno onde as partículas de um fluido se associam de forma não linear. Existem vários tipos de modelos de turbulência, como são: *Ómega Reynolds Stress*; *QI Reynolds Stress*; *LRR Reynolds Stress*; *kOmega*; *RNG k-Epsilon*; *Zero Equation*; *SSG Reynolds Stress*; *Shear Stress Transport*; *kEpsilon*. (HEUERT & KHATCHATOURIAN, 2007)

Segundo Scott-Pomerantz (2004), os investigadores Nakayama e Harlow em 1968 introduziram o modelo de turbulência, com duas equações de transporte, conhecido como *K épsilon* ( $k-\varepsilon$ ), modelo que será utilizado neste trabalho.

Segundo os autores Heuert, Khatchatourian, (2007):

$k$ : É a energia cinética turbulenta, sendo a variação das flutuações da velocidade.

$\varepsilon$ : Representa a taxa de dissipação da turbulência, com a qual as flutuações das velocidades se dissipam.

O modelo ( $k-\varepsilon$ ) incorpora duas novas variáveis ao sistema de equações. A Equação 6 da continuidade. (XAVIER, *et.al.*, 2014)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (6)$$

U: vetor de velocidade  $U_{x,y,z}$ ;

$\rho$  : massa específica;

t: Tempo.

A Equação 8 da conservação de quantidade de movimento se transforma em:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} (\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M \quad (7)$$

Onde:

$S_M$ : É a soma das forças de corpo (peso)

$\mu_{\text{eff}}$  : É a viscosidade efetiva considerada pela turbulência

U: Magnitude de velocidade.

T: Temperatura

$p'$  : É a pressão modificada.

Este modelo ( $k$ - $\mathcal{E}$ ) tem como base o conceito de viscosidade de redemoinho, de maneira que a Equação 8 fica demonstrada da seguinte forma:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (8)$$

Onde:

$\mu_t$ : É a viscosidade de turbulência.

$\mu$ : Viscosidade dinâmica.

O modelo ( $k$ - $\mathcal{E}$ ) considera que a viscosidade de turbulência está unida à energia cinética de turbulência, e sua dissipação é dada pela Equação 9:

$$\mu_t = C_\mu \rho + \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

Onde:

$C_\mu$  É uma constante.

A energia cinética turbulenta  $k$  e sua taxa de dissipação  $\mathcal{E}$ , é obtido das equações de transporte (EQUAÇÃO 10, 11) (MARTINS, 2006):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \mathcal{E} - Y_M \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathcal{E})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathcal{E} u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\mathcal{E}} \right) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right] + C_{1\mathcal{E}} \frac{\mathcal{E}}{k} (G_k + C_{3\mathcal{E}} G_b) - C_{2\mathcal{E}} \rho \frac{\mathcal{E}^2}{k} \quad (11)$$

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.

$Y_M$  : Representa a contribuição na taxa de dissipação total devido à variação volumétrica para o caso compressível.

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

$\sigma_k$   $\sigma_\mathcal{E}$  : São os números de *Prandtl* turbulentos (Para  $K$  e  $\mathcal{E}$ ).

Lauder & Spalding no ano 1972 atribuíram valores para as seguintes constantes:  $C_{1\mathcal{E}} = 1,44$ ;  $C_{2\mathcal{E}} = 1,92$ ;  $C_u = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\mathcal{E} = 1,3$ . A partir de experimentos com variados escoamentos em duto sob pressão e de superfície livre é que foi possível assinar esses valores.

### 3.3.7 Número de *Courant*

Este número adimensional é importante na análise da Dinâmica Computacional de Fluidos (CFD), já que ele é utilizado como um critério para confirmar a estabilidade numérica. O número de *Courant* relaciona as dimensões temporais e espaciais da simulação numérica computacional.

O valor deste número afeta diretamente a estabilidade da solução numérica em uma malha computacional (WANDER, 2011).

Ele é dado pela relação (EQUAÇÃO 12):

$$Co = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (12)$$

Onde:

$\Delta t$  : É o passo do tempo de integração

$\Delta x$  : É a dimensão do volume discreto

$v$  : É a velocidade de escoamento

O padrão do número de Courant é de 5,0 (ANSYS FLUENT, 2010).

### 3.3.8 Simulação Numérica Computacional

A simulação numérica computacional de um modelo de estudo ajuda bastante a resolver problemas físicos e de engenharia. Para isto, devem se utilizar os seguintes componentes (SOARES, 2007):

- a. Modelagem Matemática;
- b. Modelagem Geométrica;
- c. Geração da Malha;
- d. Aproximação Numérica;
- e. Solução Numérica;
- f. Processo Adaptativo.

Uma simulação numérica precisa resolver o sistema de equações diferenciais e algébricas, processo que pode demandar bastante tempo computacional. Esse tempo dependerá do modelo matemático utilizado, da sua complexidade, da dimensão do modelo de estudo que se deseja simular, do tempo esperado, da capacidade e características do computador utilizado e do tempo gasto da simulação.

#### 3.3.8.1 Malhas numéricas

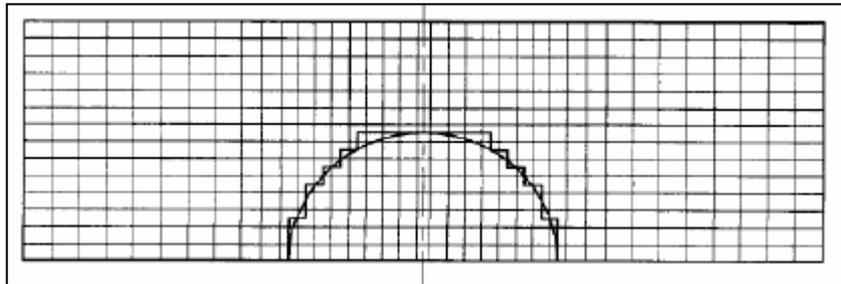
As malhas numéricas definem os pontos onde as variáveis são calculadas. Estas representam a forma de discretização do domínio geométrico onde será resolvido o problema. A malha faz a divisão desse domínio em números finitos de sub- domínios.

As malhas podem ser classificadas da seguinte forma:

1. Ortogonal: Estruturada
2. Não Ortogonal: Estruturada e não estruturada.

A malha ortogonal é utilizada no caso da geometria simples, como representada na Figura 6. Como exemplo, neste tipo de malha, onde atravessa um cilindro, a fronteira poderia ser uma aproximação e as células que estão no interior do cilindro não se consideram no cálculo matemático. Por isto que trabalhar com este tipo de malha traz algumas desvantagens, como aproximações de fronteira e possíveis erros (GONÇALVES, 2007).

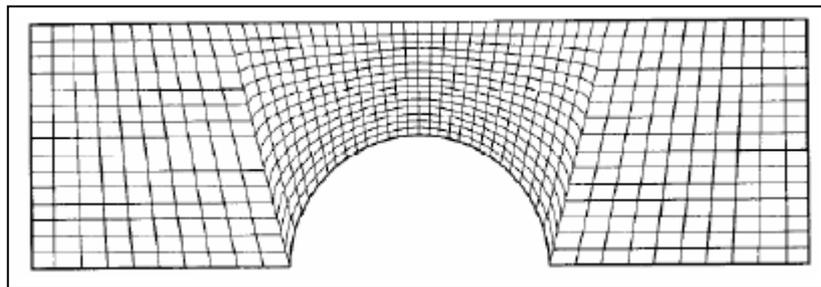
Figura 6 - Malha Ortogonal



Fonte: GONÇALVES, 2007

Pelas dificuldades mencionadas anteriormente na malha ortogonal, se tem desenvolvido as malhas não ortogonais (GONÇALVES, 2007). Na Figura 7 mostra um exemplo deste tipo de malha.

Figura 7 - Malha Não Ortogonal adaptada a um cilindro.



Fonte: GONÇALVES, 2007

Uma malha de boa qualidade se consegue quando todos seus elementos são satisfatórios, no formato e tamanho. As malhas podem ser estruturadas e não estruturadas, as quais se

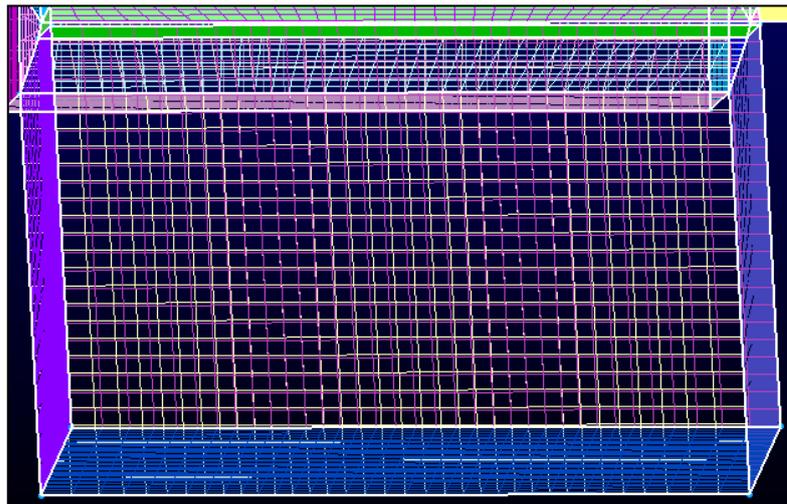
diferenciam entre sim, porque o formato da malha estruturada é totalmente uniforme e a não estruturada não tem essa característica (SOARES, 2007).

Para trabalhar é mais fácil utilizar uma malha estruturada, já que se pode manipular e gerá-la de uma forma mais fácil, reduzindo a dificuldade de programação já que funciona com estruturas de dados simples, porém, só podem ser aplicadas em domínios que possuam geometrias de média complexidade e as vezes torna moroso distribuir os pontos dentro da malha, sobre tudo em 3D (SOARES, 2007), mas uma malha estruturada facilita o esforço computacional empregado (SCHNEIDER, MALISKA, 2000).

Uma malha estruturada apresenta pouca flexibilidade de refinamento, gerando algumas vezes uma resolução excessiva em certas regiões do escoamento em regiões críticas, a resolução portanto se torna insuficiente para observar resultados razoáveis (ESTACIO, 2004).

Para diminuir algumas deficiências na utilização de uma malha convencional estruturada, ela pode ser elaborada por blocos (FIGURA 8), podendo ser utilizada em domínios complexos, já que é possível refinar a malha dentro de um bloco determinado que necessite de maior precisão (SOARES, 2007).

Figura 8 - Bloco de uma malha estruturada 3D.

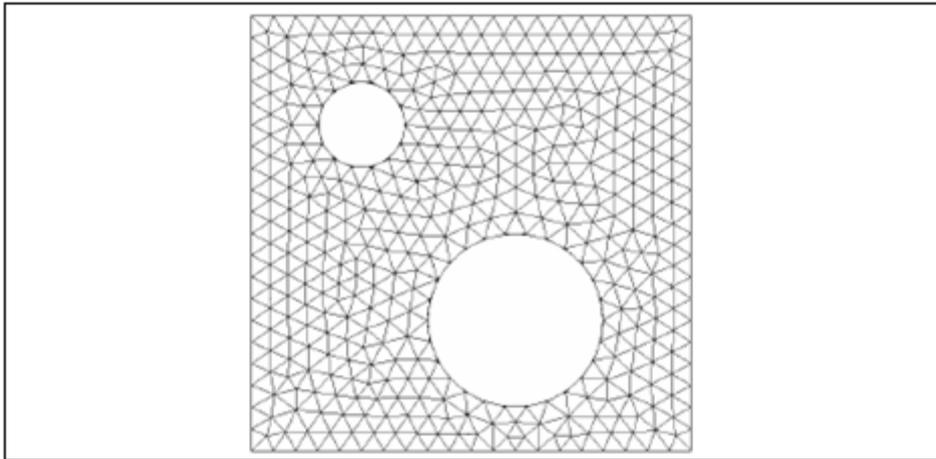


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

Malhas não estruturadas na discretização de domínios é bastante utilizada para métodos numéricos, pela facilidade de trabalho em geometrias complexas, já que é possível variar o

formato da malha e o espaçamento em qualquer região (SCHNEIDER, MALISKA, 2000) (FIGURA 9). Porém existe uma irregularidade muito grande na estrutura de dados deste tipo de malha. Assim, a implementação de algoritmos nesse tipo de malha torna a aplicação dos métodos numéricos mais complexa (SOARES, 2007).

Figura 9 - Exemplo de uma malha não estruturada, onde atravessam 2 tubos.



Fonte: SOARES, 2007.

Independentemente do tipo de malha na qual se deseje trabalhar, deve-se considerar o número de elementos da malha, já que, o tamanho dos elementos define as condições e características na geração da malha. Se os elementos forem pequenos, existe maior precisão na malha, mas exige uma quantidade de tempo maior de processamento. O tamanho dos elementos, porém depende também do fenômeno físico a ser estudado (SOARES, 2007).

Um refinamento eficiente da malha computacional é importante para a solução de equações diferenciais, devido a todas as variáveis envolvidas (BRANDÃO, 2008).

### **3.3.9 Tipos de Softwares majormente utilizados em Modelos Hidrodinâmicos**

Atualmente, computadores estão sendo cada vez mais rápidos, alcançando assim as necessidades dos usuários. Nos últimos anos, o nível de potência computacional aumentou e muitos modelos de complexidade considerável, podem ser resolvidos em um período de tempo relativamente breve (NIELSEN, 2011).

Alguns dos tipos de softwares mais utilizados por engenheiros, no que respeita a simulação numérica computacional são:

- 1) *FLUENT*: Este software utiliza as formas discretizadas das Equações de *Navier- Stokes* para resolver de forma precisa a hidrodinâmica do modelo (velocidade, pressão, energia). O programa é capaz de fazer modelação uni, bi e tridimensional. A capacidade de *FLUENT* envolve a resolução de problemas tridimensionais complexos, o código tridimensional utilizado neste trabalho foi o Método de Volumes Finitos, que é um método muito comum para modelar o fluxo de escoamentos para inúmeras aplicações, por tanto, se torna uma ótima ferramenta para o estudo de escoamentos livres multifásicos (NIELSEN, 2011). Neste estudo se utilizará este programa. Este tipo de software é um dos mais utilizados, depois do *OPENFOAM*, já que este último é gratuito e o *FLUENT* tem um custo de licença.
- 2) *OPENFOAM*: Este software é gratuito e é bastante utilizado por usuários das áreas de engenharia e ciências. Ele tem uma gama ampla de recursos para resolver problemas referentes a escoamentos de fluidos complexos, que envolvem turbulência, transferências de calor, reações químicas, entre outros. Este tipo de software ao ser de acesso livre, os usuários têm completa liberdade para personalizar a funcionalidade existente. Existem códigos modulares onde as funcionalidades são compiladas em sua própria biblioteca compartilhada. O programa possui mais de 80 aplicações do solucionador que simula problemas específicos na mecânica engenharia e mais de 170 serviços públicos que realizam tarefas de pré e pós processamentos. (OPENFOAM, 2015)
- 3) *CFX*: Este software é de tipo robusto e flexível para uso geral de dinâmica de fluidos computacional, utilizado para resolver problemas abrangentes com relação a fluxos de fluidos de alto nível de complexidade. Ele oferece uma ampla gama de modelos físicos que podem ser aplicados em diferentes tipos áreas e aplicações, com variadas capacidades de personalização e automação. (CAE, 2015)
- 4) *FLOW-3D*: O Software oferece aos engenheiros informações importantes sobre processos de fluxos físicos, sendo uma ferramenta útil para a dinâmica de fluidos

computacional. Configurado para simulação de pós processamento. Este programa não tem módulos adicionais necessários, por tanto é avançado e simples de executar. Ao possuir uma estrutura cartesiana, ele executa geometrias complexas de forma automática para resolução de localização e eficiência computacional. (FLOW SINCE, 2015)

### **3.4 Monitoramento para avaliar comportamento de peixes**

#### **3.4.1 Técnicas de monitoramento de peixes**

Na literatura existem vários métodos para estudar o comportamento de peixes no meio aquático bem como realizar contagem e estimar densidade e abundância de cardumes. Alguns desses métodos serão mencionados a seguir.

##### **3.4.1.1 Telemetria**

A palavra telemetria é derivada de “tele”, que significa remoto, e “metron”, que significa medida. A telemetria é uma tecnologia que permite medições de dados feitos à distância e inclui tecnologias amplamente utilizadas, como as redes de rádio, telefonia e computador. A telemetria de peixes na definição mais ampla envolve todos os métodos (Figura 10) utilizados para obter informações sobre peixes em agrupamento (cardumes), como o uso de ecossondas, observação visual de vídeos, rádios e etiquetas eletrônicas (PRIEDE, 1988; THORSTAD *et al.*, 2013).

Figura 10 - Exemplos dos principais tipos de etiquetas eletrônicas ativas.



Fonte: THORSTAD *et al.*, 2013 (Imagem traduzida para o idioma português)

#### 3.4.1.2 Técnicas de monitoramento de peixes:

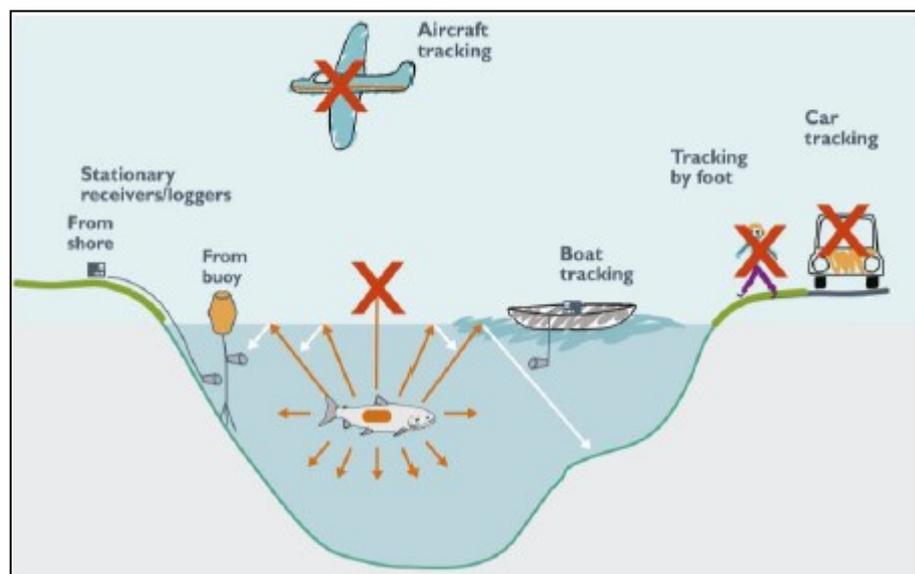
- a) Radio Telemetria: Consiste na utilização de um transmissor de rádio implantado no peixe, o qual, emite sinais para um receptor (antena), normalmente localizado próximo ao curso d'água. Os sinais de rádio se propagam tanto na água como no ar (ADAMS,*et al.*, 2012).
- b) Hidroacústica: Consiste na utilização do som transmitido, para identificar organismos na coluna d' água e avaliar informações, como a batimetria de um rio, quantidade e distribuição de espécies aquáticas. Uma ecosonda é necessária para analisar dados hidroacústicos, transmitindo um pulso de alta voltagem para um transdutor, este por sua vez, converte a energia elétrica gerada, em uma onda de som ou pulso, onde é liberada na água. A onda de som ao encontrar algum elemento com diferente densidade do meio ao seu redor, é refletida parcialmente e é capturada pelo transdutor (BRANDT, 1996).
- c) Etiquetas repetidoras de integração passiva (*PIT-TAG*): São denominadas passivas porque elas não possuem bateria. Esta tecnologia funciona como um leitor de código de barras de uma caixa de supermercado, o peixe leva em seu interior um chip (*Pit-Tag*) e quando ele passa pelas antenas registradoras dos códigos de barras, o peixe fica registrado (JIE, 2009).

- d) Armazenamento de dados através de etiquetas DST (*Data storage tag*): São etiquetas ligeiramente flutuantes na água e conseguem armazenar grandes quantidades de gravações, dependendo do modelo a utilizar. (GODØ, 2000). Todos os dados medidos pela etiqueta ficam armazenados em uma memória interna do dispositivo. Depois de recuperada a etiqueta, após o período de medição, os dados gravados são carregados em um software, onde podem ser vistos e analisados (STAR ODDI, 2015).
- e) *Pop-up* Etiqueta de arquivamento via Satélite (*PSAT*): Esta técnica permite grandes estudos de migração de peixes no oceano. Coleta informações sobre o ambiente do peixe: a luz, pressão e temperatura da água. Depois de um período pré-programado, a etiqueta flutua para a superfície, sinalizando a localização do peixe. Quando o transmissor aparece na superfície, o posicionamento é gravado e os dados são transferidos para os satélites ARGOS. (THORSTAD *et al.*, 2013).

### 3.4.1.3 Telemetria Acústica

Esta técnica utiliza transmissores acústicos que são semelhantes aos transmissores de rádio ligados ao peixe e permite registrar o movimento de peixes de forma exata, em 2 e 3 dimensões (ADAMS *et al.*, 2012) (FIGURA 11).

Figura 11 - Método utilizado através da Telemetria Acústica.



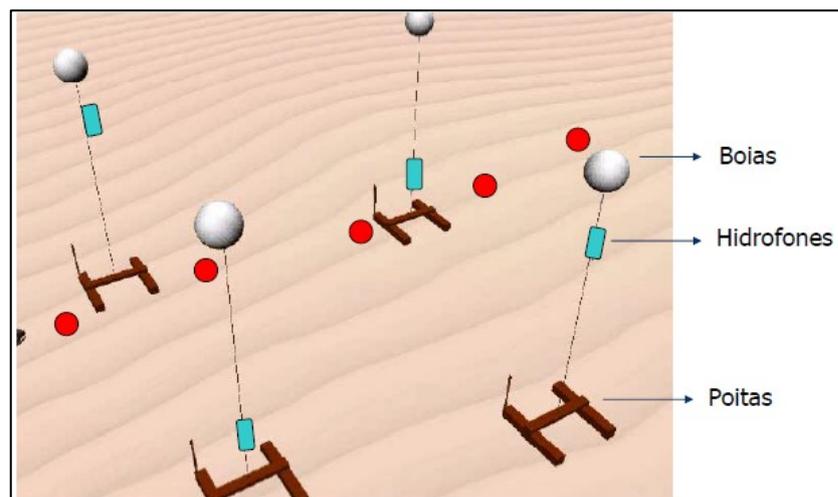
Legenda: Transmissores acústicos só podem ser gravados por hidrofones colocados dentro da água.

Fonte: THORSTAD *et al.*, 2013.

Os sinais acústicos são ondas de pressão que se propagam unidirecionalmente através da água e o ar. Os hidrofones, que atuam como uma antena receptora, são submersos na água para gravar os sinais acústicos e determinar a posição do peixe. (THORSTAD, *et al.*, 2013). O tempo que leva para o sinal alcançar cada hidrofone permite determinar a posição do peixe por triangulação, mesmo princípio utilizado pelo GPS (Sistema de Posicionamento Global)(SUZUKI, 2014) (FIGURAS 12).

Cada peixe de forma individual pode ser reconhecido através da utilização de transmissores com uma combinação única de frequência e taxa de pulso, ou também por meio de sinais codificados, como descritos anteriormente para os transmissores de rádio. (THORSTAD, *et al.*, 2013). A vantagem principal de utilizar transmissores codificados é que todos os transmissores emitem sinais na mesma frequência, permitindo assim que os receptores sejam mais baratos(BENTES, 2008).

Figura 12 - Sistema de Medição de Telemetria acústica dentro da água



Fonte: SUZUKI, 2014

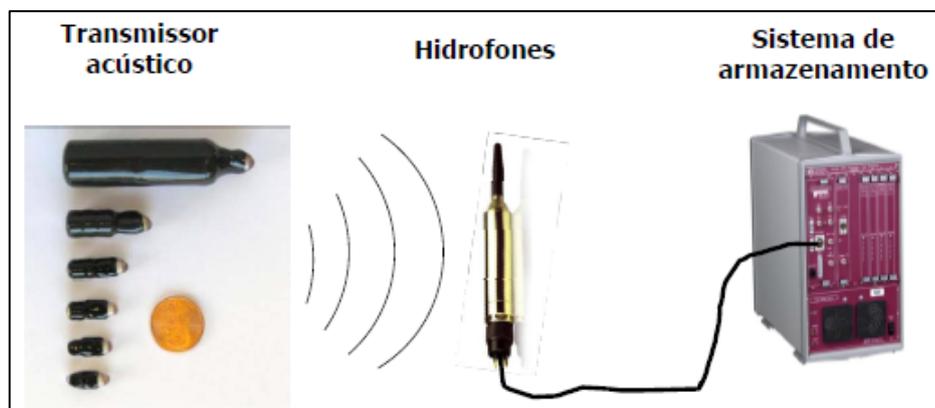
Esta tecnologia pode ser utilizada tanto no mar, como em lagos e rios, sendo o rastreamento manual ou automático (THORSTAD, *et al.*, 2013). Neste método, os receptores se encarregam de receber as ondas acústicas e a transformar e armazenar os dados recebidos (BENTES, 2008). Nesse caso pode ser utilizado um *data logger* (ou gravador de dados) o qual consiste em um dispositivo eletrônico que registra todos os dados ao longo do tempo. Comumente, eles são baseados em um processador digital, como um computador. Os *data logger* em geral são

pequenos, possuem uma bateria portátil e uma memória interna para armazenar os dados(PIOVESAN, 2008) (FIGURA 13).

A telemetria acústica tem sido aplicada para avaliar questões tais como: movimentos de peixes criados em piscicultura e lançados em rios após seu desenvolvimento inicial (MITAMURA *et al.*, 2008); eficiência de proteção de áreas marinhas (KNIP *et al.*, 2012); capacidade de deslocamentos de espécies migradoras (MITAMURA *et al.*, 2012) e efeitos da poluição da água (THORSTAD, *et al.*, 2013).

Segundo Suzuki (2014), no Brasil essa técnica está começando a ser aplicada, enquanto na América do Norte a ferramenta é muito utilizada para estudo de comportamento de peixes. Destaca-se a utilização da telemetria acústica em estudos de migração de jovens salmões para construção de passagem de peixes (GOODWIN *et al.*, 2006).

Figura 13 - Materiais utilizados para realização de amostras através da Telemetria Acústica



Fonte: SUZUKI, 2014.

Em síntese, a telemetria acústica transmite dados através de ondas de som enquanto a radio telemetria transmite dados através de ondas de rádio. A vantagem da telemetria acústica em comparação com a radio telemetria, é que a telemetria acústica tem um maior alcance dentro da água, pode ser aplicada em água salgada e água doce e permite a detecção em resolução submétrica em 3D. Em geral a telemetria acústica entrega um plano mais amplo e claro da vida submarina, permitindo estudar longas movimentações de peixes bem como comportamento do mesmo em diferentes tipos de habitat (BENTES, 2008).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange um trecho de 3 Km a jusante da barragem da Usina Hidrelétrica de Três Marias (FIGURA 14) e o canal de fuga da respectiva Usina (FIGURA 15). Simular o trecho de 3 km permite perceber as variáveis hidráulicas em um trecho maior, onde os peixes percebem estas variáveis antes de serem atraídos ao canal de fuga da Usina Hidrelétrica.

Figura 14 - Imagem Satélite do trecho a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias.



Fonte: GOOGLE MAPS, 2015. (Imagem modificada pela autora, delimitação de estudo).

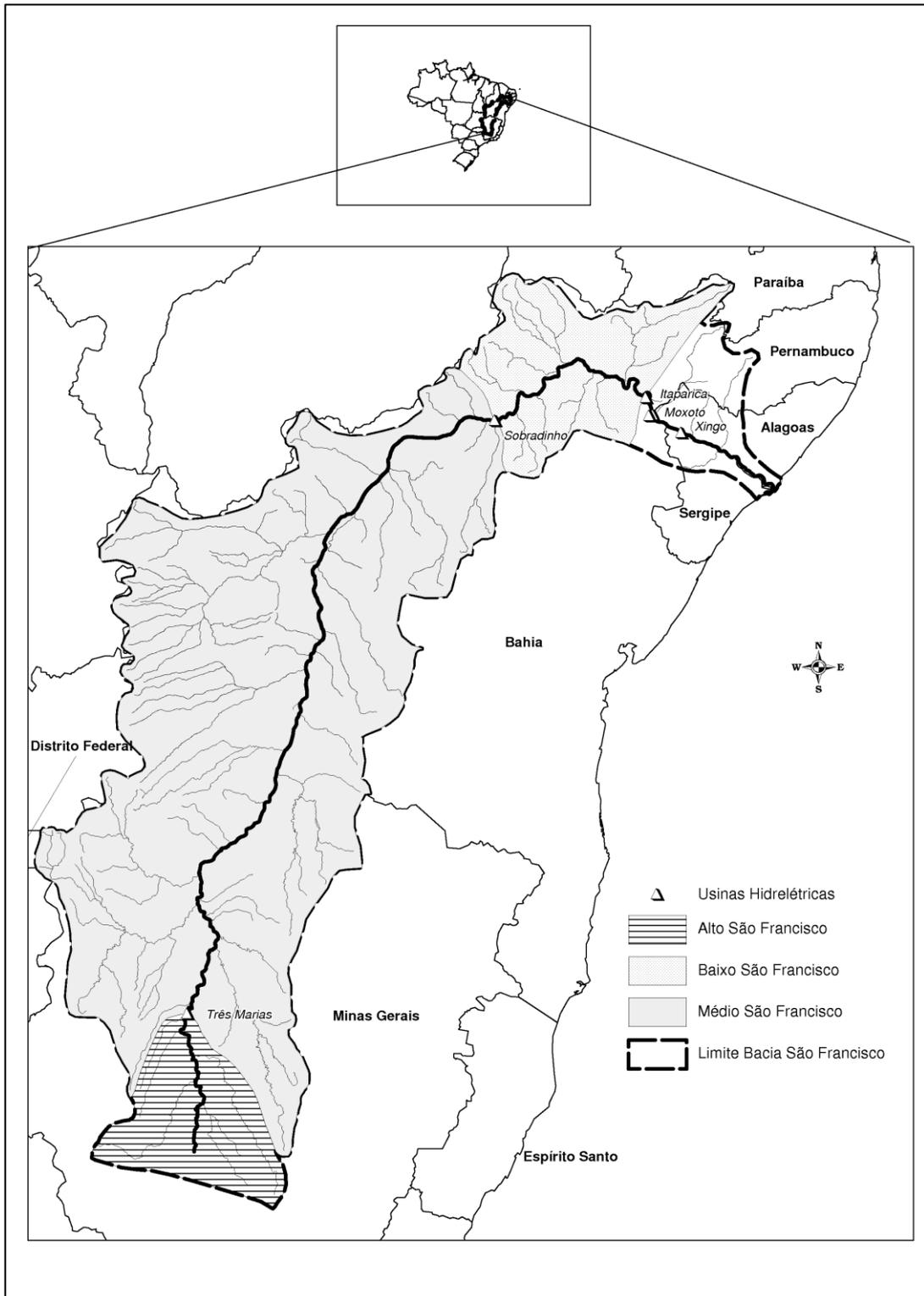
Figura 15 - Canal de Fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias.



Fonte: SANTOS, 2011.

O reservatório de Três Marias, está localizado na região do Alto da Bacia do Rio São Francisco, entre os paralelos de latitude sul de 18° e 21° e os meridianos 43° 30' e 46° 40' oeste de longitude, no estado de Minas Gerais, Brasil (ONS, 2005) (FIGURA 16). A Usina Hidrelétrica de Três Marias começou sua construção em 1957 e entrou em operação em 1962. Sua função inicial era de regulação do Rio São Francisco e mais tarde foi utilizada para aproveitamento hidrelétrico (ONS, 2005). A Usina apresenta 6 unidades geradoras com potência instalada de 396 MW, tem um comprimento de barragem de 2.700 m e altura de 75 m (FIGURA 17) (CEMIG, 2015).

Figura 16 – Localização do Reservatório de Três Marias na Bacia do Rio São Francisco.



Fonte: SANTOS, 2016.

Figura 17 – Estruturas hidráulicas da Usina hidrelétrica de Três Marias.



Fonte: CEMIG, 2012. (Imagem modificada pela autora, identificação dos componentes da Usina Hidrelétrica).

## 4.2. Geometria de Estudo

### 4.2.1. Geometria do Rio

Para simulação numérica foi necessária a construção da geometria do trecho do rio (3 Km) e do canal de fuga da Usina. Foram utilizados dados coletados em campo no dia 26 de Outubro 2011 (DUARTE, 2014).

O instrumento utilizado para levantar os dados de profundidade e velocidade foi o *ADCP* (*Acoustic Doppler Current Profiler*) (FIGURA 18). As medições foram realizadas em onze seções ao longo do rio e em cada seção, foram feitos quatro transectos recíprocos, totalizando assim 44 transectos (DUARTE, 2014).

Figura 18 - *ADCP*, acoplado ao barco para levantamento dos dados de Batimetria



Fonte: SANTOS, 2011.

O *ADCP* mede a velocidade do fluxo em perfis verticais, emitindo uma frequência de onda sonora de 1200 KHz. Esta velocidade é refletida por partículas suspensas na água e pelo leito do rio. A frequência da onda que é recebida tem valor alterado (efeito *doppler*) e, desta forma, é estimada a velocidade das partículas (CARVALHO, 2008). Para que esses dados coletados tivessem referência geográfica, se utilizou um GPS (Sistema de Posicionamento global) diferencial acoplado ao *ADCP* no barco (FIGURA 19).

Figura 19 - GPS colocado ao lado do ADCP no barco.



Fonte: SANTOS, 2011.

Durante as medições, a base do GPS diferencial foi colocada na margem esquerda do rio (FIGURA 20).

Figura 20 - GPS localizado na margem esquerda do rio.



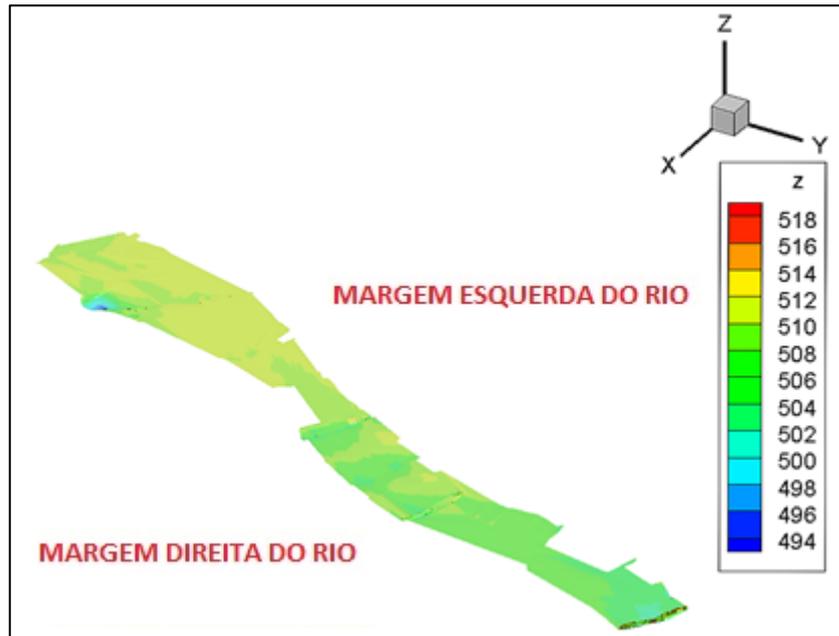
Fonte: SANTOS, 2011.

Após a obtenção dos dados de profundidade do rio, a partir do equipamento *ADCP*, e a identificação das coordenadas de posicionamento, gerados pelo GPS, gerou-se uma planilha no programa Excel com as informações de longitude (x), latitude (y) e altitude (z) de vários pontos do trecho do rio.

Para que o *software TECPLOT*, programa que gerou a batimetria do rio, permitisse a interpolação dos dados, foi necessário um ajuste de correção de coordenadas. Isto porque as coordenadas em UTM são algarismos longos e geram um “*bug*” no *software*. Se obteve o valor mínimo do total dos dados de latitude (y) 7986234,303 e longitude (x) 472033,936 do rio e estes valores foram subtraídos para cada valor individual de latitude e longitude, do total dos dados da batimetria do rio.

Estes dados foram importados para o programa *TECPLOT 360/2009* utilizando a extensão ".dat". Em seguida, através do método de triangulação, os pontos foram interpolados no domínio (Figura 21).

Figura 21 - Batimetria do rio, representada no programa *TECPLOT*.



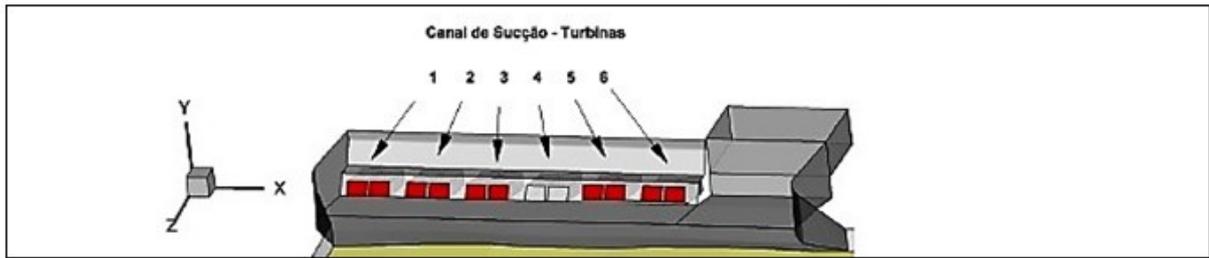
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

Após a interpolação do fundo do rio no programa *TECPLOT*, exportou-se os dados do bloco gerado em formato de *ASCII*.

#### 4.2.2 Geometria do Canal de Fuga

O canal de fuga da Usina de Três Marias foi construído seguindo os passos de Duarte (2014), ele utilizou o software *Solid Works* para geração da geometria (FIGURA 22). Ele é composto pela saída de 6 turbinas. Para obtenção do plano do canal de fuga, foram utilizadas plantas antigas fornecidas pela CEMIG. No presente estudo, será considerado um cenário de geração utilizando 5 turbinas, estando uma inoperante (turbina 4). No item definição das condições de contorno, este cenário será melhor detalhado.

Figura 22 - Geometria do Canal de Fuga da Usina com turbinas em funcionamento em vermelho.



Fonte: DUARTE, 2014 (Houve adaptação da Figura).

### 4.3 Criação da malha de estudo

A malha foi construída no software *GRIDGEN* versão 15.17 e foi do tipo ortogonal estruturada. A escolha do tipo de malha, foi definida porque uma malha estruturada costuma ser mais estável que uma malha não estruturada.

As etapas foram as seguintes:

#### 4.3.1 Malha do rio.

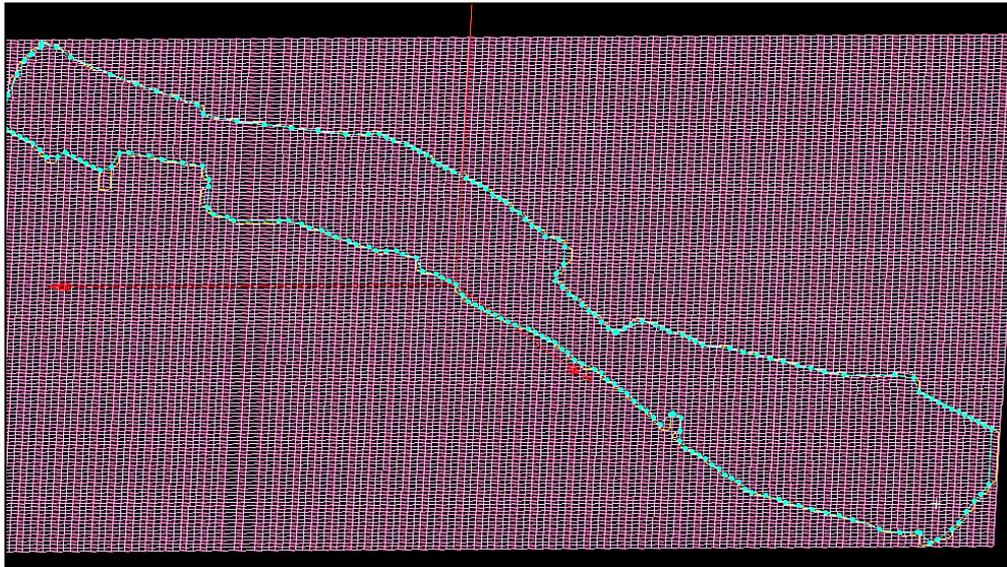
##### 4.3.1.1 Intersecção do plano e a malha do rio:

A criação da malha se inicia utilizando o software *GRIDGEN*. Para começar se deve importar o arquivo "xyz\_txt.dat" do programa *TECPLOT* e a partir dos pontos escolhidos de x, y, z, se consegue criar um plano no *GRIDGEN* chamado de *Database*, para assim fazer uma intersecção entre o plano e a malha.

##### 4.3.1.2 Geração dos conectores:

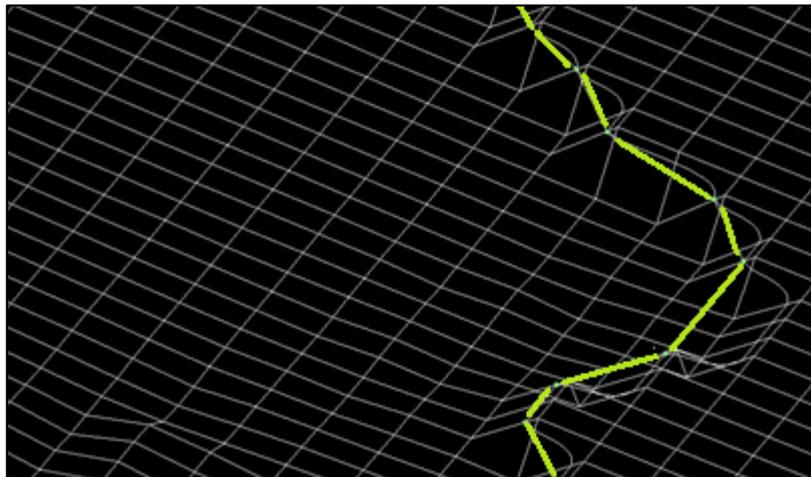
Realizada a intersecção, o passo seguinte é fazer os conectores (FIGURAS 23,24). Uma vez criados os conectores em todo o contorno da área do rio, são feitos os conectores transversais.

Figura 23 - Plano e conectores do rio, no programa *GRIDGEN*.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015.

Figura 24 – Maior visualização dos conectores do rio e o plano.

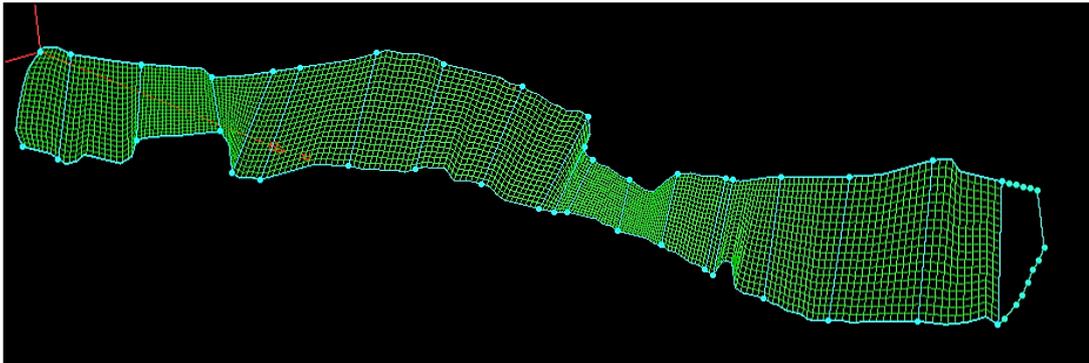


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

#### 4.3.1.3 Geração dos domínios:

Uma vez dimensionados os segmentos (conectores) de cada parte da malha, os domínios foram produzidos (FIGURA 25), tentando deixar cada seção (domínio) o mais uniforme possível (próximo a quadrados). Uma malha de boa qualidade se consegue quando todos seus elementos são satisfatórios, no formato e tamanho (SOARES, 2007).

Figura 25 - Domínios da malha do rio.

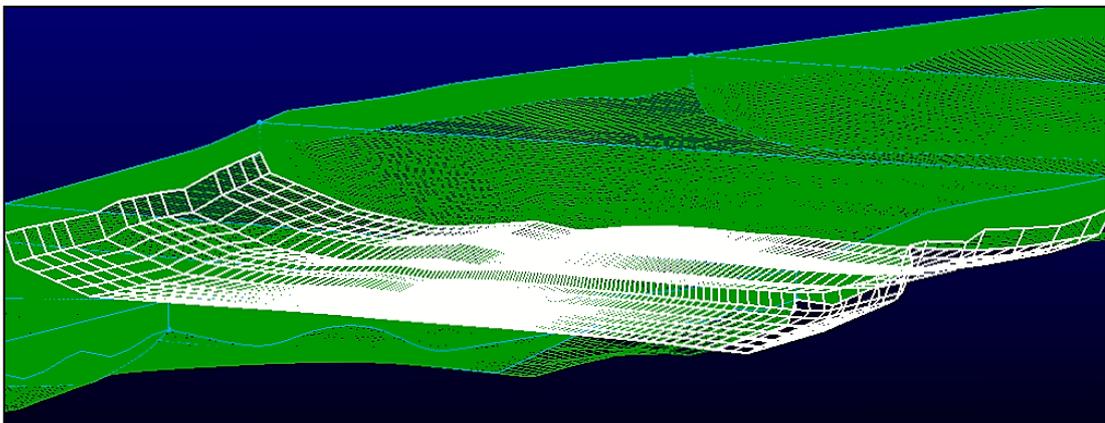


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015.

#### 4.3.1.4 Plano de projeção com a topografia do rio

Realizados os domínios, se deve criar um plano de projeção da parte de cima do rio, para se juntar com a parte da topografia do rio (parte de baixo) (FIGURA 26). Logo, se devem fechar ambos planos da geometria, fazendo conectores verticais entre um plano e outro.

Figura 26 - Plano de projeção do rio, topografia do rio (parte de baixo)

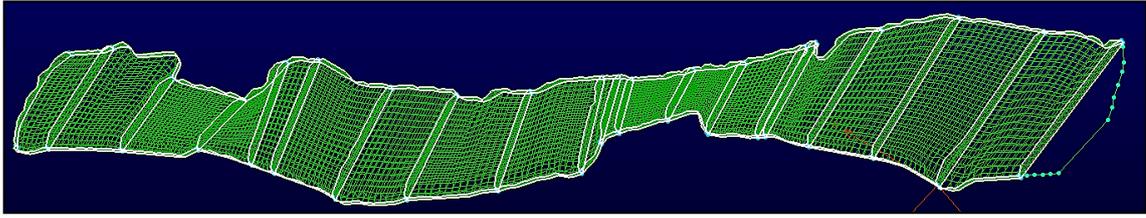


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

#### 4.3.1.5 Geração dos blocos do rio:

Finalmente os blocos foram feitos usando os domínios já formados. Neste caso a malha do rio consta de 20 blocos (FIGURA 27).

Figura 27 - Blocos da geometria do rio.



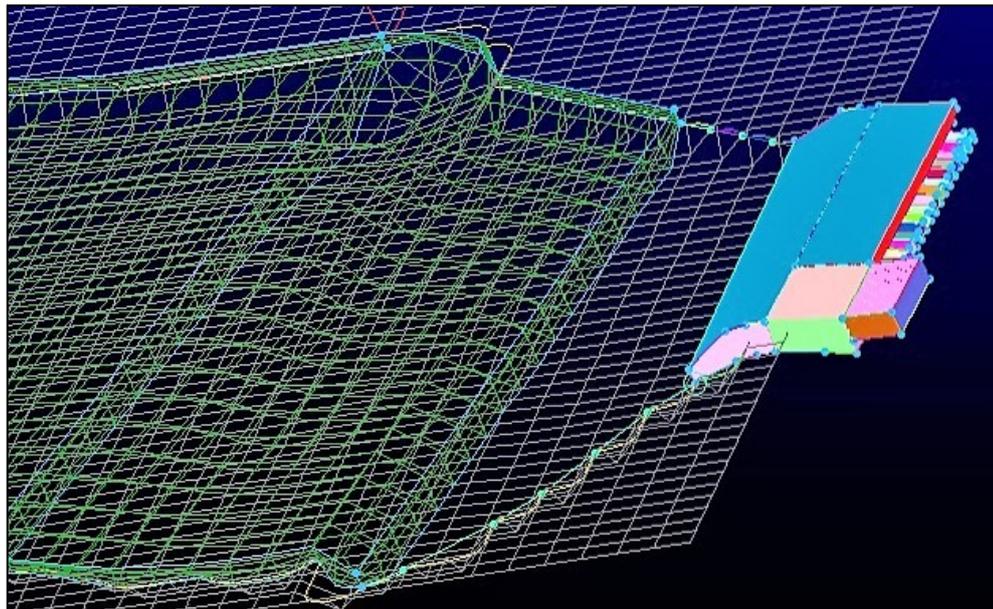
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

#### 4.4 Malha do canal de fuga

##### 4.4.1 Adaptação da malha do canal de fuga:

Após a finalização das etapas descritas, uniu-se a malha do rio com malha do canal de fuga. (FIGURAS 28). Na união de ambas malhas, foram necessárias várias adaptações e um tempo considerável para chegar na convergência entre ambas.

Figura 28 - União da malha do rio com a malha do canal de fuga.

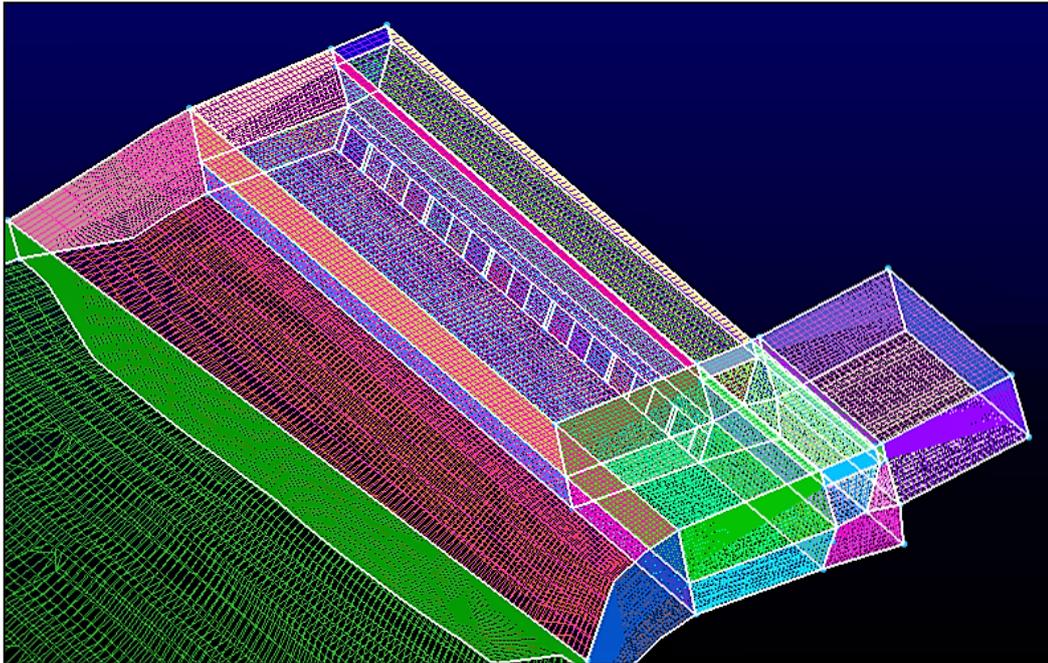


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

#### 4.4.2 Geração dos blocos:

O canal de Fuga teve que sofrer alterações na sua geometria, para conseguir adaptá-lo com a geometria do rio. Os blocos alguns foram modificados e se criaram novos blocos com tamanhos diferentes, para conseguir fechar a estrutura completa (FIGURA 29).

Figura 29 - Blocos da malha do canal de fuga.



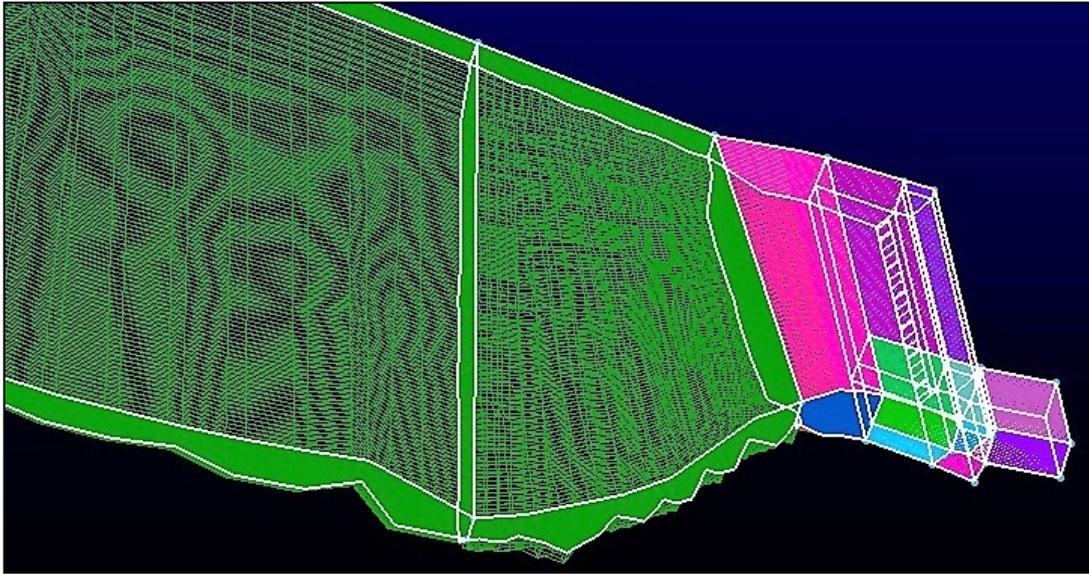
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015.

#### 4.5 Malha de modelo de estudo completo

##### 4.5.1 Convergência entre a malha do rio com a malha do canal de fuga:

Esta etapa teve um grau de dificuldade considerável uma vez que as malhas possuíam elementos diferentes e interface entre as duas deve possuir o mesmo formato. Foram vários dias para conseguir a convergência, realizando várias adaptações principalmente na malha do canal de fuga (FIGURA 30).

Figura 30 - Geometrias unificadas criando o Modelo de Estudo

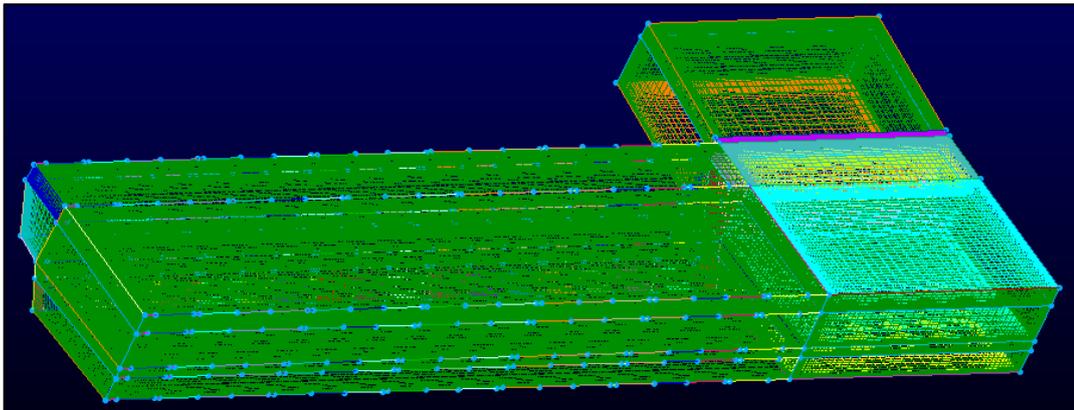


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015

#### 4.5.2 Definição da malha que será utilizada na simulação numérica computacional.

Considerando a comparação entre os dados hidráulicos e biológicos, uma vez que estes últimos foram coletados apenas na região do canal de fuga, optou-se por definir o domínio a ser simulado, somente a área do Canal de Fuga (FIGURA 31).

Figura 31 - Malha do canal de Fuga após refinamento final



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2016.

A malha consta dos seguintes elementos, segundo Tabela 1.

Tabela 1 - Número de Elementos da Malha de Estudo, 2015.

Elementos	Quantidade
Conectores	467
Domínios	112
Total de Blocos	20
Nº de Hexaedros da Malha	1.483.948
Nº Total de Pontos	1.533.297

Fonte: Dados trabalhados pelo autor, 2016.

#### 4.5.3 Refinamento e qualidade da Malha

Refinamento refere-se ao tamanho dos elementos de uma malha, quanto menor o tamanho de elementos significa que houve um maior refinamento, por tanto, existirá também um maior tempo gasto na simulação e vice-versa. Este procedimento foi realizado ainda no programa *GRIDGEN*, onde foi gerada a malha de estudo.

Para que a simulação numérica, no programa *FLUENT* ocorra sem problemas e o cálculo matemático possa ser resolvido de forma exata, uma convergência numérica e um tempo razoável de simulação, foi necessário avaliar os seguintes aspectos da qualidade das malhas:

#### 4.5.4 Fator “*Y plus*”

Este fator está relacionado ao modelo de turbulência, neste caso o ( $K-\varepsilon$ ). Este fator *Y plus* é a distância normal não-dimensional a partir do primeiro ponto da malha à parede, esta medida longitudinal adimensional é utilizada para determinar o refinamento necessário que deve ter a malha na área perto da parede para cumprir as condições necessárias para o bom funcionamento do tratamento próximo a parede selecionada na ferramenta *ANSYS FLUENT* (SOLLEIRO, 2010).

Uma distância não dimensional para um fluxo delimitado na parede da malha pode ser definida da seguinte forma, segundo Equação 13 (CFD, 2014):

$$y+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (13)$$

Onde:

$u_*$  : É a velocidade de atrito na parede mais próxima.

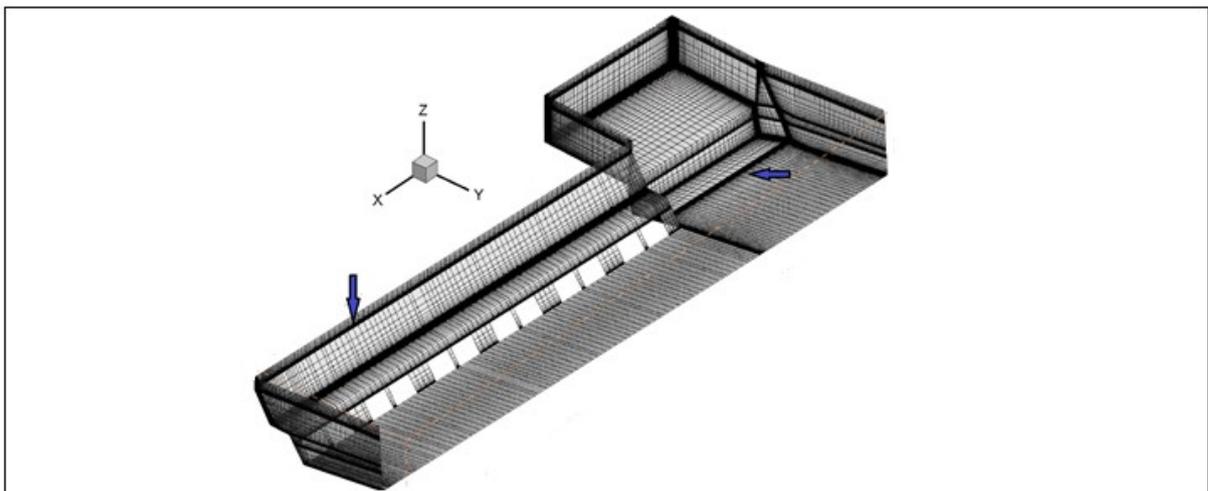
$y$  : É a distância à parede mais próxima.

$\nu$  : É o local de viscosidade cinemática do fluido.

Os valores aceitos para este fator variam entre 30 e 300, sendo estes, considerados como aceitáveis (ANSYS FLUENT, 2010). Desta forma, trabalhou-se com a malha no *software GRIDGEN*, de forma a ter o *Y plus* dentro desta faixa.

Foi necessário realizar um refinamento maior em todas as partes do domínio próximas à parede, diminuindo o tamanho dos elementos nessas áreas.

Figura 32 - Malha do canal de Fuga após refinamento do Fator *Y plus*.



Legenda: As setas azuis indicam alguns dos refinamentos realizados nas paredes da malha.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2016.

#### 4.5. 5 Razão de Aspecto

A razão de aspecto é a razão entre a maior e a menor aresta do elemento.

Figura 33 - Razão de Aspecto.



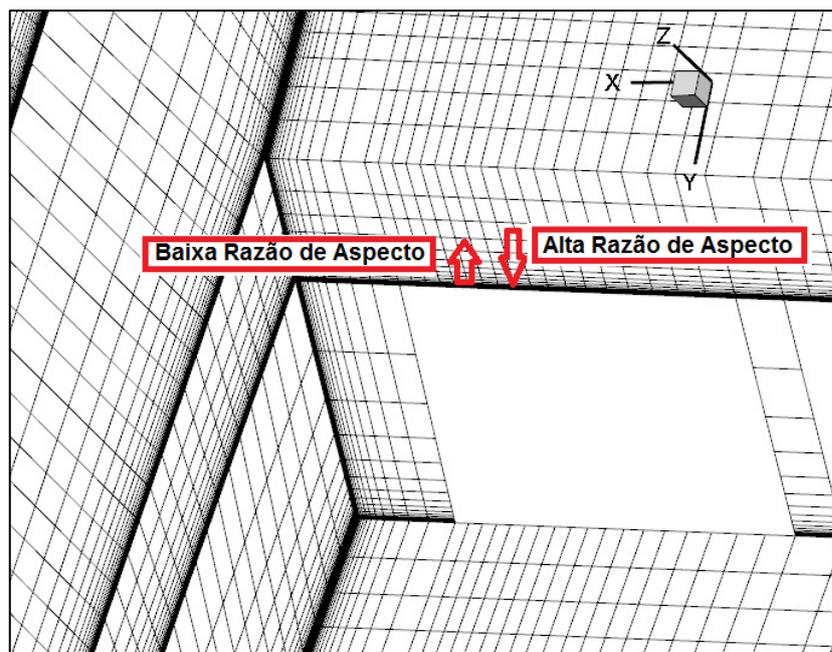
Fonte: NOTAS CFD, 2016.

O ideal é que o valor da razão de aspecto seja 1, se sugere evitar valores muito altos já que podem levar a erros na aproximação numérica dos fluxos nas faces. Porém este valor aumenta em soluções tridimensionais e em casos onde são utilizadas malhas quad/hexaédricas (NOTAS CFD, 2016).

A razão de aspecto para a malha do canal de fuga que o programa GRIDGEN entrega, foram os seguintes:

- Mínima razão de aspecto = 445.124
- Máxima razão de aspecto = 1.

Figura 34 - Razão de Aspecto da Malha do Canal de Fuga



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 4.5.6 Qualidade da Ortogonalidade

A qualidade da ortogonalidade de uma malha, tem relação com os ângulos entre as faces dos elementos ou entre as arestas de elementos que se encontram próximos a um ângulo ótimo. Para elementos com faces quadrilaterais,  $90^\circ$  e para elementos com faces triangulares,  $60^\circ$ . Quanto maior o ângulo, pior a ortogonalidade da malha (DE SOUZA, 2011).

A ocorrência de uma má ortogonalidade da malha afeta diretamente a aproximação numérica dos fluxos e pode ocorrer difusão numérica de erros na solução do problema computacional (NOTAS CFD, 2016).

Os valores da qualidade da ortogonalidade da malha do canal de fuga, obtidos através do programa GRIDGEN, foram:

- Valor mínimo de ortogonalidade:  $37^\circ$
- Valor máximo de ortogonalidade:  $90^\circ$ .

#### 4.5.7 Definição do índice de *Skewness*.

Nas regiões onde a geometria da malha é complexa e sua dimensão é reduzida, pode ocorrer a distorção de alguns volumes. O índice de *Skewness* avalia a qualidade da malha e mostra as partes que não estão uniformes no seu tamanho e forma (assimétricas). Portanto, estas devem ser refinadas e melhoradas, para que, posteriormente, o programa *FLUENT* reconheça a malha como ótima, realizando os cálculos matemáticos das equações diferenciais de forma exata (TAVARES, 2011).

A Figura 35 mostra o *Skewness*, o qual varia entre 0 (excelente) e 1 (inaceitável) representando a distorção de um elemento em relação à forma que seria o ideal para essa geometria (TAVARES, 2011).

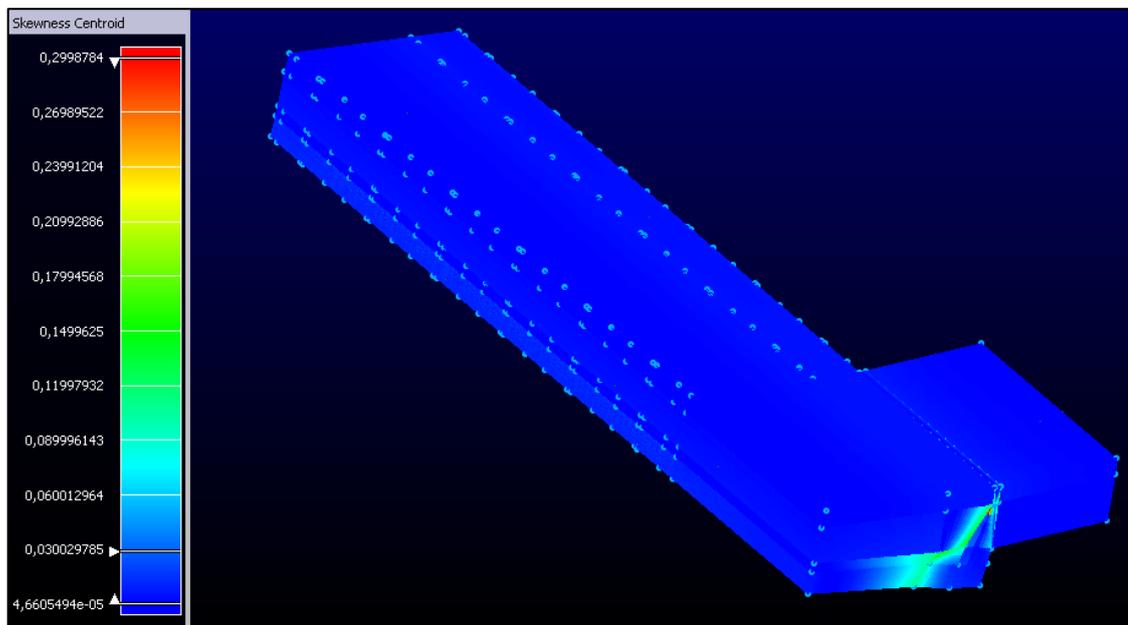
Figura 35 - Escala e gama de valores para o *Skewness* (Indicador da qualidade da malha gerada).



Fonte: TAVARES, 2011.

O esperado é que os elementos fiquem dentro do possível o mais perto da cor azul (excelente índice de *Skewness*) (FIGURA 36).

Figura 36 – Exemplo do Índice de *Skewness* da malha do canal de fuga.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015.

Os índices correspondentes à malha do canal de fuga foram:

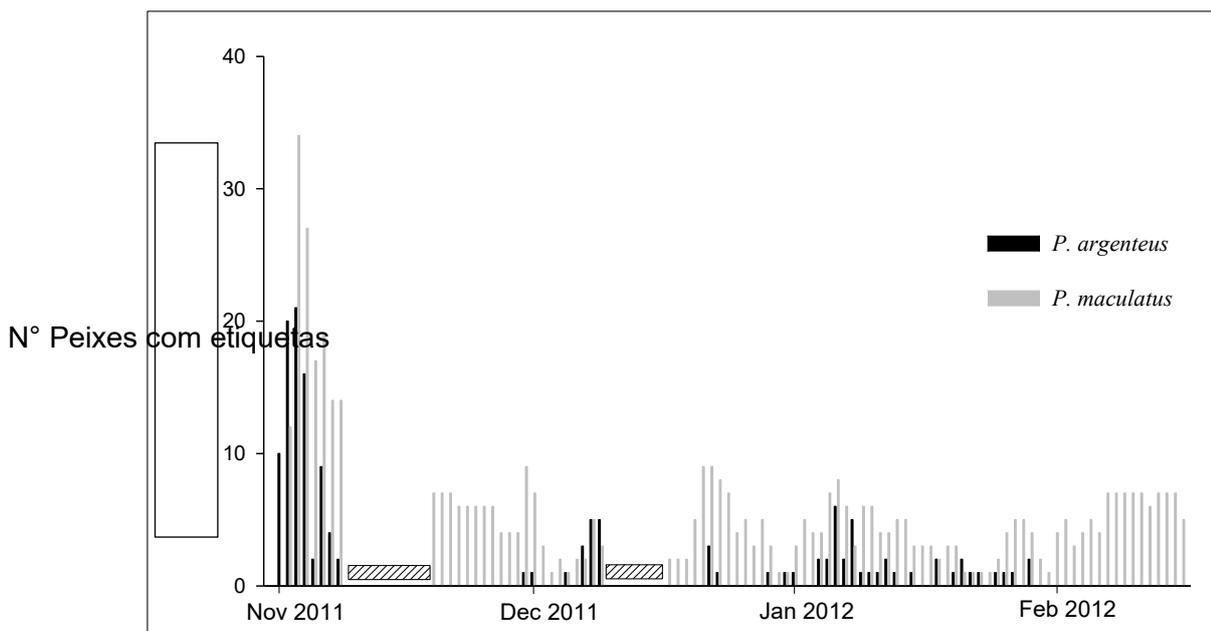
- Mínimo *Skewness* = 4.66055e-05
- Máximo *Skewness* = 0.299878.

#### 4.5.8 Definição das condições de contorno:

A definição da vazão a ser simulada, que permitiu a comparação dos dados biológicos com os hidráulicos, considerou-se dois aspectos:

1. Possível influencia na marcação dos peixes: De acordo com estudo realizado por Suzuki (2014), os dados biológicos coletados através de Telemetria acústica foram realizados no período de 31 de outubro de 2011 a 16 de fevereiro de 2012 (FIGURA 37). No presente estudo optou-se por usar as informações coletadas com a telemetria acústica, 15 dias após a soltura dos peixes marcados no canal de fuga, utilizando o período de 19 Novembro a 22 Dezembro de 2011. Segundo Suzuki, (2014) o desempenho de natação pode ser afetado nos primeiros dias após a aplicação de marcação e alguns peixes com etiquetas demoram alguns dias para se recuperar totalmente da cirurgia, o que pode provocar estresse dos peixes e mudar seu comportamento. Desta forma, procurou-se analisar as vazões que ocorreram neste período.

Figura 37 - Quantidade de peixes registrados através de Telemetria acústica.



Legenda: Número de peixes com etiquetas registrado (*Prochilodus argenteus* e *Pimelodus maculatus*) por dia no canal de fuga da Usina de Três Marias: 31 out. 2011 a 16 de fev. 2012.

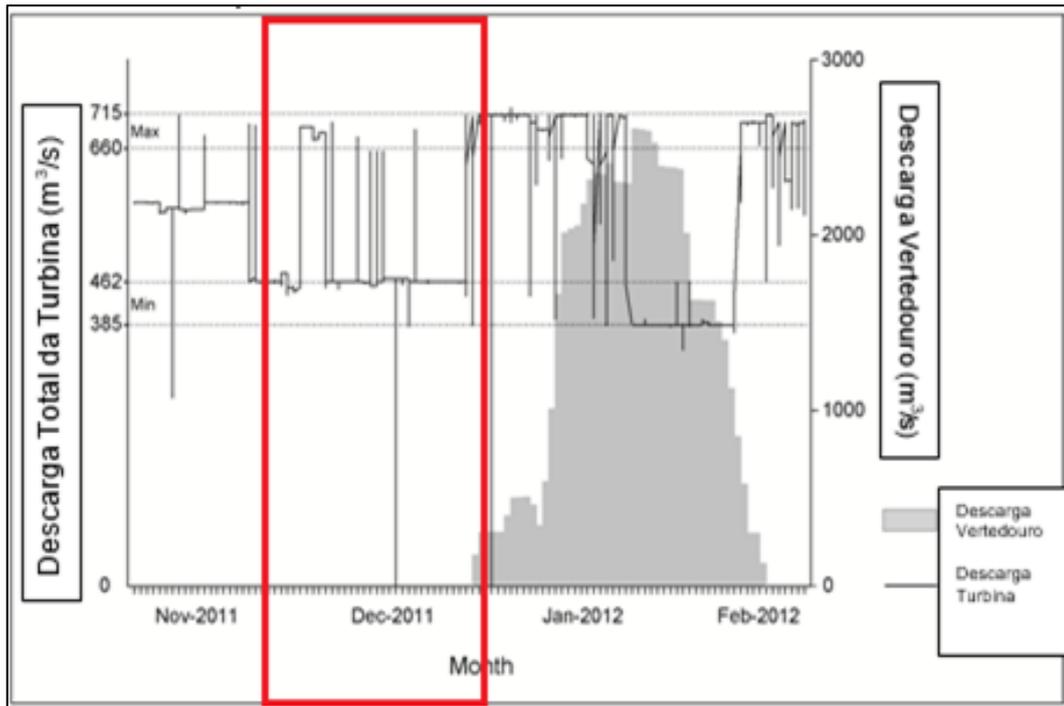
▨: Não houve medições devido a problemas técnicos no receptor acústico ou no fornecimento de energia.

Fonte: SUZUKI, 2014.

2. A não ocorrência de vertimento: O escoamento do vertedor pode provocar alterações no escoamento verificado no canal de fuga. Desta forma, como não seria possível anexar ao modelo numérico a estrutura do vertedor, optou-se por trabalhar com o período aonde não ocorria vertimento.

A Figura 38 mostra a variação das turbinas e a descarga do vertedouro da represa de Três Marias. O período escolhido (19 Novembro a 22 Dezembro 2011) não apresentou descarga do vertedouro. Assim, a vazão média de 462 m<sup>3</sup>/s foi a vazão mais representativa, repetindo-se três vezes no período do cenário analisado.

Figura 38 - Nível de vazões das Turbinas e Vertedouro da represa de Três Marias.



Legenda: Variação horária de turbina total e descarga do vertedouro (m<sup>3</sup>/s) na represa de Três Maria, de 31 de Outubro de 2011 a 16 de fevereiro de 2012. As linhas pontilhadas representam o intervalo do total de cenários de descarga da turbina: Min - Mínimo e Max - Máximo.

Fonte: SUZUKI, 2014

Portanto, o nível de vazão escolhido (19 Novembro a 22 Dezembro de 2011) se deveu a: Período mais representativo de dados biológicos e valor de vazão não afetado pela descarga do vertedouro.

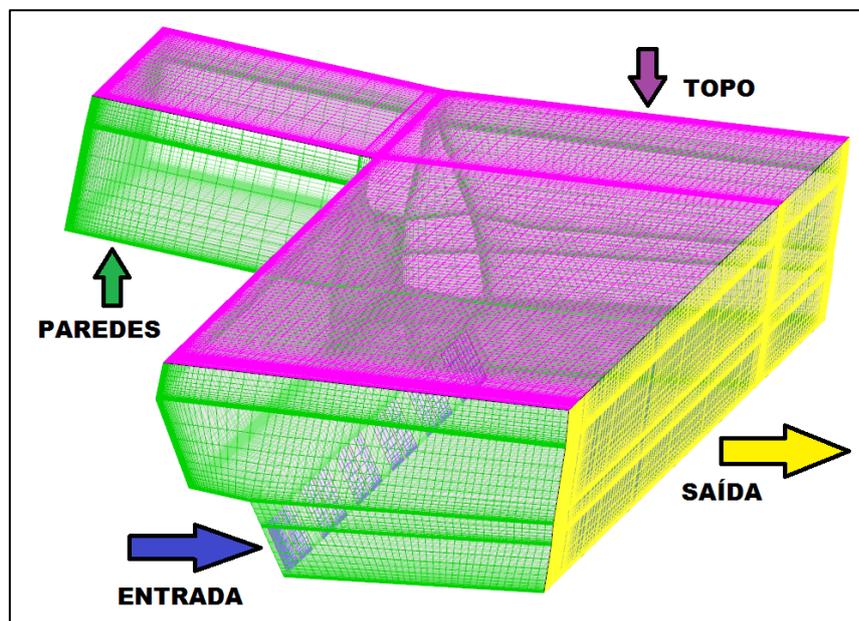
Assim, as condições de contorno foram:

- i. Setor de Entrada: Vazão média das turbinas, 462 m<sup>3</sup>/s.
- ii. Setor de Saída: A saída do domínio, corresponde a parte extrema do rio.
- iii. Topo: Parte superior do rio, onde duas fases podem estar presentes (ar – água).

- iv. Parede: Correspondem a todas as partes imóveis e impermeáveis da malha, sendo estas, todas as faces laterais do rio e as faces rígidas do canal de fuga (Tabela 2).
- v. Interfaces: Refere se a interface, cada superfície que separa malhas com refinamentos diferentes, neste caso, houve as seguintes interfaces:

Se considerará uma ação de gravidade ao qual estará submetido o modelo de estudo de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e uma pressão atmosférica de 101.325 Pascal.

Figura 39 – Condições de contorno do canal de fuga.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2015.

As condições de contorno de acordo a Tabela 2, mostra os seguintes componentes:

Tabela 2 - Condições de Contorno da malha do Canal de Fuga.

Condições de Contorno	Número de Faces
Parede	54
Topo	6
Entrada do Fluido (5 Turbinas)	12
Saída do Fluido	1

Fonte: Dados trabalhados pelo autor, 2016.

#### 4.6 Simulação numérica computacional do estudo

Após definidas as condições de contorno e o refinamento da malha do canal de fuga no programa *GRIDGEN*, foi possível exportar o arquivo da malha no formato "cas" para o software *ANSYS FLUENT*. Este software utiliza as formas discretizadas das Equações de *Navier - Stokes* para resolver de forma precisa a hidrodinâmica do modelo. A capacidade de *FLUENT* envolve a resolução de problemas tridimensionais complexos. O código tridimensional utilizado pelo software foi o Método de Volumes Finitos que é um método muito comum para modelar o fluxo de escoamentos para inúmeras aplicações, por tanto, se torna uma ótima ferramenta para o estudo de escoamentos multifásicos (NIELSEN, 2011).

Se utilizou o modelo VOF (*Volume of Fluid*), que considera dois fluidos, neste caso ar e água. Por isso a condição de contorno do topo do rio foi adotada como *Pressure Outlet*.

Considerou-se a abordagem de turbulência da média de Reynolds, sendo que no modelo *K-epsilon* utilizado no programa *FLUENT* adotou-se os valores de  $k$  e  $\varepsilon$  igual a:

- Turbulência de energia cinética:  $1e-06 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$
- Taxa de dissipação de turbulência:  $1e-07 \text{ (m}^2/\text{s}^2)$

No programa *FLUENT* foram definidas algumas condições antes de começar a fazer a simulação da malha (TABELA 3):

Tabela 3 - Características previas antes da simulação, 2016

Características	Medida
Eixo z (Gravidade)	9.81 m/s <sup>2</sup>
Código Tridimensional	Modelo VOF
Nº Faces <i>Eurelianas</i>	2 (Ar- Água)
Pressão Atmosférica	101.325 <i>Pascal</i>
Densidade da Água	998 Kg/m <sup>2</sup>

Fonte: Dados trabalhados pelo autor, 2016.

De acordo aos dados biológicos realizados através de Telemetria acústica, foram definidos os valores médios de vazão proporcionados pela CEMIG no período de 19 de Novembro a 22 de Dezembro de 2011. Desta forma, devido a operação do período, 5 turbinas que estavam funcionando e a turbina Nº 4 se encontrava em manutenção, foram então adotadas as seguintes vazões por turbina (Tabela 4).

Tabela 4 - Vazão das Turbinas, 2011.

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

Fonte: CEMIG, 2011.

Em primeira instancia, se colocaram a rodar 3 malhas de estudo para ver qual delas gastava menos tempo computacional:

- 1) Malha do Canal de Fuga (FIGURA 40) com *Time Step* variável (quer dizer, que o próprio programa *FLUENT* vai calculando o tempo de simulação). A simulação começou com os seguintes parâmetros:

Data da simulação: 19 de Maio 2016

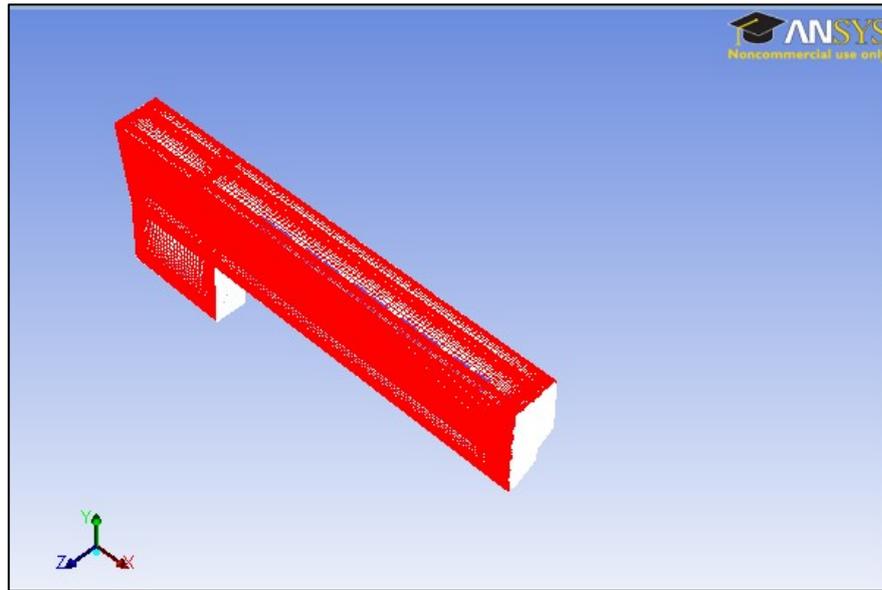
*Time Step*: Variável.

Números de *Time Steps*: 10000000

Máximas Iterações de *Time Step*: 10

Número de *courant*: 0.90

Figura 40 – Malha do Canal de Fuga no programa *FLUENT*



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2016.

2) Malha do canal de fuga com o primeiro bloco do rio (FIGURA 41)

Data da simulação: 22 de Maio 2016

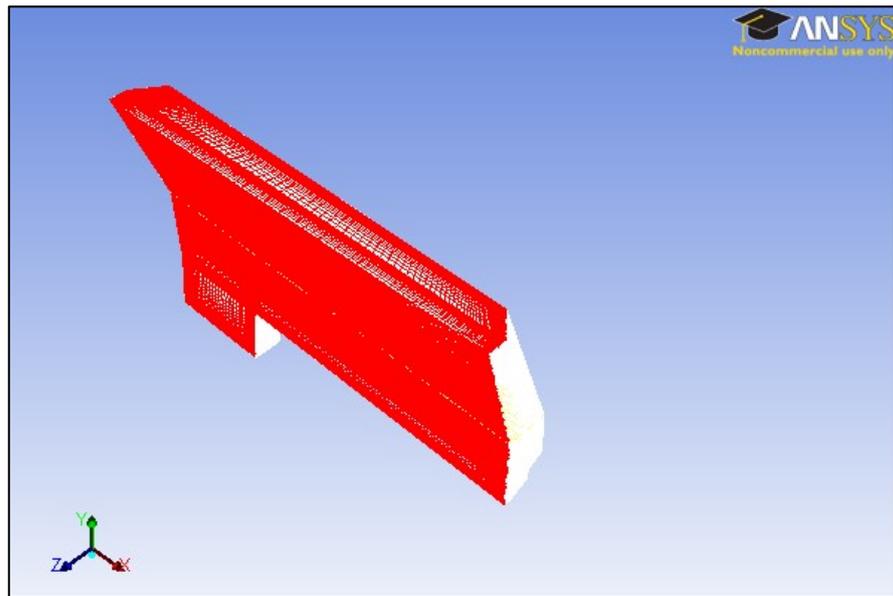
*Time Step*: Variável.

Números de *Time Steps*: 10000000

Máximas Iterações de *Time Step*: 10

Número de *courant*: 0.90

Figura 41 – Malha do Canal de Fuga com o primeiro bloco do rio.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2016.

- 3) Malha do canal de Fuga com *Time Step* fixo de 0.001 e foi aumentando até 0.003

Data da simulação: 01 de Junho 2016

*Time Step*: 0.001 – 0.003

Números de *Time Steps*: 10.000.000

Máximas Iterações de *Time Step*: 5

Número de *courant*: 0.25 a 6.26 (Variável)

O intervalo de tempo (*Time Step*) quer dizer, como exemplo da terceira malha, que a cada máximo 5 iterações, as equações serão resolvidas em 0.001 segundos, totalizando um máximo de 10.000.000 intervalos de tempo.

O computador utilizado para a simulação numérica possui as seguintes características: Processador: Intel® Xenon® CPU ES-2620 @ 2.00GHz 2.00 GHz (utilizando 4 processadores em paralelo) e um Memória interna (RAM) de 128 GB.

## **4.7 Análise de dados Biológicos**

Os dados biológicos coletados através da técnica da Telemetria acústica, foi realizado por Suzuki (2014). Neste trabalho foram selecionados os peixes que permaneceram no canal de fuga dentro do período que o canal de fuga operou com vazão média escolhida como condição de contorno.

### **4.7.1 Seleção dos peixes**

Nas medições realizadas através da técnica de telemetria acústica, foram monitorados 79 peixes no total (Suzuki, 2014). Assim, foi necessário fazer uma seleção de quais peixes poderiam ser analisados neste trabalho, tendo como referência os peixes que acessaram o canal de fuga no período selecionado (19 Novembro a 22 Dezembro 2011).

No mês de Novembro foram 62 peixes monitorados e no mês de Dezembro 17 peixes, totalizando 79 peixes onde se tem registro de medições (Suzuki, 2014). Porém somente 16 peixes registraram medições em ambos meses e 5 desses peixes foram selecionados de forma aleatória. A identificação dos peixes correspondente às espécies *Prochilodus argenteus*: 3322; 4183; 4393; e *Pimelodus maculatus*: 4960; 5296. Dentro de esses 5 peixes, foram selecionados 2 indivíduos para fazer a análises dos dados, por ter um nível de medições maior e mais representativa que os outros, os quais foram: *Prochilodus argenteus* 3322 e *Pimelodus maculatus* 5296.

### **4.7.2 Correção de coordenadas**

Para trabalhar com os dados biológicos, coletados através da técnica de telemetria acústica, realizada por Suzuki, (2014), foram necessárias correções de coordenadas. Isto se deve ao fato que as coordenadas coletadas na telemetria acústica foram obtidas com *GPS* diferente do utilizado para coleta das informações hidráulicas. Assim, teve-se os seguintes passos:

#### **4.7.2.1 Dados da Batimetria do Rio e Dados de Telemetria Acústica:**

O mesmo princípio utilizado nos dados da batimetria do rio (explicado no ponto 4.2.1) foi aplicado para os dados biológicos. Os dados da batimetria foram normalizados para algarismos

menores através da subtração dos valores mínimos, observados na seção batimétrica em estudo. Esses valores foram novamente subtraídos dos dados de telemetria acústica para cada peixe.

- Longitude (x) batimetria do rio= 472033,936
- Latitude (y) batimetria do rio = 7986234,303

#### 4.7.2.2 Identificação dos Hidrofonos:

Analisou-se o posicionamento dos Hidrofonos e suas coordenadas e verificou-se a existência de diferença entre as coordenadas obtidas com o GPs dos dados biológicos e hidráulicos. Assim, a informação coletada com GPS dos dados hidráulicos para 3 dos 11 Hidrofonos dos dados biológicos (FIGURA 43) permitiu a correção (Hidrofonos 4, 6, 1 nos dados da Batimetria do rio (FIGURA 42), como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Coordenadas geográficas dos Hidrofonos, nas medições de Batimetria do rio.

Hidrofonos	Ponto x	Ponto y	Ponto z (elevação)
4	472374,437	7986194,127	513,4
6	472294,292	7986216,942	512,598
1	472403,352	7986193,443	510,266

Fonte: SANTOS, 2016.

Figura 42 - Posicionamento de Hidrofonos, nas medições realizadas a traves da batimetria do rio



Fonte: SANTOS, 2016.

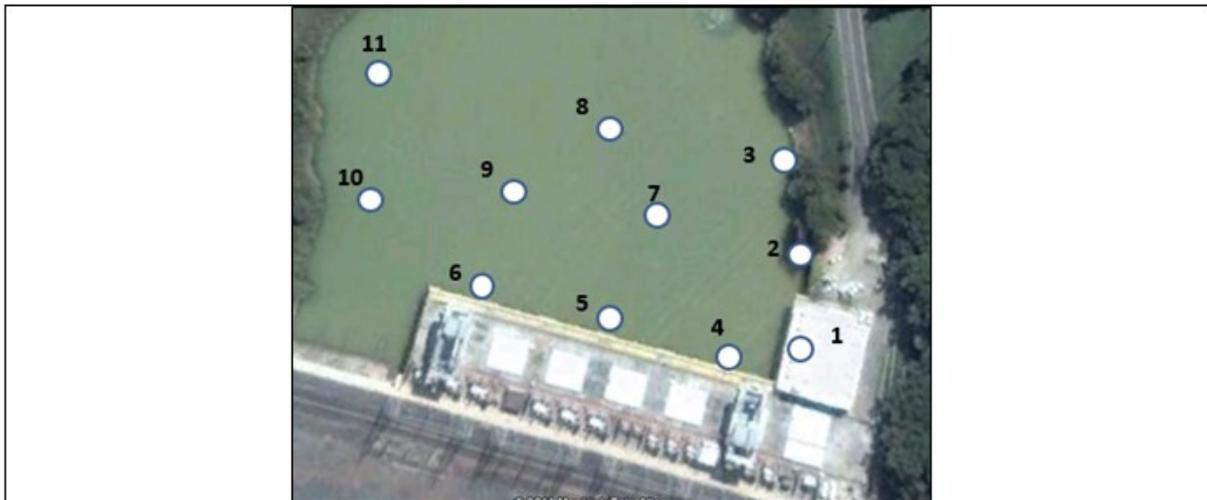
A Tabela 6 mostra o posicionamento e as coordenadas dos dados de Telemetria acústica.

Tabela 6 - Coordenadas geográficas e a posição na coluna d'água de cada Hidrofone no Canal de Fuga.

Hidrofones	Ponto x	Ponto y	Ponto z (Fundo)
1	472406,8	7986189	5,1
2	472414,8	7986236	10,5
3	472403,9	7986274	9
4	472375,7	7986192	10,4
5	472325,2	7986208	4,8
6	472293,9	7986212	10,5
7	472358,9	7986248	3,2
8	472336	7986289	9,1
9	472290,2	7986258	4,7
10	472252,9	7986254	2,1
11	472255,9	7986299	8,8

Fonte: SUZUKI, 2014.

Figura 43 - Posicionamento de Hidrofones, nas medições realizadas através de telemetria acústica.



Fonte: SUZUKI, 2014.

A Tabela 7 mostra o grau de diferença entre ambas medições realizadas (Telemetria acústica e Batimetria do rio).

Tabela 7 - Diferença de coordenadas dos três hidrofones, medidos através da batimetria do rio e a telemetria acústica.

Hidrofones Batimetria	Ponto x	Ponto y	Hidrofones Telemetria	Ponto x	Ponto y	Dif."x"	Dif."y"
4	472374,44	7986194,13	6	472293,9	7986212	-0,392	4,942
6	472294,29	7986216,94	4	472375,7	7986192	1,263	-2,127
1	472403,35	7986193,44	1	472406,8	7986189	3,448	-4,443

Legenda: "Dif." Quer dizer diferença entre os pontos "x" e "y" de ambas medições.

Fonte: SANTOS, 2016.

Devido a estes fatores e incerteza natural dos equipamentos utilizados, foi necessário fazer um ajuste de coordenadas nos dados de Telemetria acústica. Assim, utilizou-se uma correção média da Longitude (x) e a Latitude (y) dos três Hidrofones:

- Longitude média (x): 1.43967
- Latitude média (y): -0.5427

Após isto, esses dois valores médios de "x" e "y", foram somados nas coordenadas de posicionamento dos dados de Telemetria acústica, para cada peixe analisado.

Na Figura 44, se mostra um exemplo dos dados anteriormente descritos.

Figura 44 - Exemplo do Peixe código 3322, tomando em consideração os dados do Peixe medidos através da Telemetria acústica.

Código	Espécie	Dados Telemetria		Correção (Hidrofonos)		Dados Telemetria Final	
		PosX	PosY	X	Y	PosX	PosY
3322	Prochilodus argenteus (Curimatã)	472255.345	7986279.686	1.43967	-0.5427	472256.785	7986279.143
		472255.4864	7986278.798	1.43967	-0.5427	472256.926	7986278.26

Dados Telemetria Final		Dados Batimetria do rio		Dado Final por cada Peixe	
PosX	PosY	x	y	x	y
472256.785	7986279.143	472033.936	7986234.303	222.8487074	44.83980187
472256.926	7986278.255	472033.936	7986234.303	222.9900553	43.95227319

Legenda: A imagem superior mostra a soma dos dados corrigidos na Identificação dos Hidrofonos, entregando o dado final da Telemetria acústica. Na imagem inferior, se observam os dados da Telemetria subtraindo os dados da Batimetria do rio, dando como resultado a posição exata do peixe, no eixo longitudinal (x) e latitude (y).

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 4.7.2.3 Ajuste final Longitude (x) e Latitude (y) dos dados Biológicos

Mesmo com os ajustes anteriores, houve diferença das coordenadas obtidas com GPS dos dados biológicos e com GPS dos dados hidráulicos. Assim, foi necessário fazer um ajuste final dos dados biológicos, com relação a latitude e longitude. Os dados foram então deslocados para esquerda (oeste na latitude) e para cima (norte na longitude).

Assim obteve-se o valor máximo do eixo “x” e o valor mínimo do “y” de cada um dos 16 peixes analisados., como mostra a Figura 45:

Figura 45 - Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes

Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes	
Max X	385.564
Min Y	-58.03

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Também foi necessário encontrar o "x" máximo e o "y" mínimo dos dados hidrodinâmicos correspondentes ao canal de fuga através do programa *TECLPLOT 360*, como mostra a Figura 46:

Figura 46 - Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes

Dados Hidráulicos	
X máx.	333.385
Y min	-37.064

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Por tanto, foram subtraídos os dados biológicos dos dados hidrodinâmicos, como mostra a Figura 47:

Figura 47 - Dados de Longitude máxima (x) e Latitude mínima (y) do total dos 16 Peixes subtraindo os valores de Longitude máxima (x) e Latitude mínima (y) dos dados Hidráulicos correspondentes ao Canal de Fuga, entregando o valor Final corrigido de ambos dados.

<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Máx. X</td> <td>385.564</td> </tr> <tr> <td>Min Y</td> <td>-58.03</td> </tr> </tbody> </table>	Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes		Máx. X	385.564	Min Y	-58.03	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dados Hidráulicos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X máx.</td> <td>333.385</td> </tr> <tr> <td>Y min</td> <td>-37.064</td> </tr> </tbody> </table>	Dados Hidráulicos		X máx.	333.385	Y min	-37.064	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>52.18</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-20.96</td> </tr> </tbody> </table>	Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos			52.18		-20.96
Longitude Máxima (x) e Latitude Mínima (y) do Total dos 16 Peixes																				
Máx. X	385.564																			
Min Y	-58.03																			
Dados Hidráulicos																				
X máx.	333.385																			
Y min	-37.064																			
Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos																				
	52.18																			
	-20.96																			

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Posteriormente subtraiu-se o dado final por cada peixe (a posição do peixe) pelo total da subtração dos dados biológicos e hidrodinâmicos, entregando o dado final de posicionamento exato do peixe, com seu valor corrigido, como mostra a Figura 48:

Figura 48 - Posicionamento do Peixe, corrigido.

<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Dado Final por cada Peixe (Posição do Peixe)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>222.8487074</td> <td>44.83980187</td> </tr> </tbody> </table>	Dado Final por cada Peixe (Posição do Peixe)		x	y	222.8487074	44.83980187	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>52.18</td> <td>-20.96</td> </tr> </tbody> </table>	Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos		x	y	52.18	-20.96	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Posição do Peixe Corrigido</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td> <td>y</td> </tr> <tr> <td>170.669</td> <td>65.802</td> </tr> </tbody> </table>	Posição do Peixe Corrigido		x	y	170.669	65.802
Dado Final por cada Peixe (Posição do Peixe)																				
x	y																			
222.8487074	44.83980187																			
Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos																				
x	y																			
52.18	-20.96																			
Posição do Peixe Corrigido																				
x	y																			
170.669	65.802																			

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

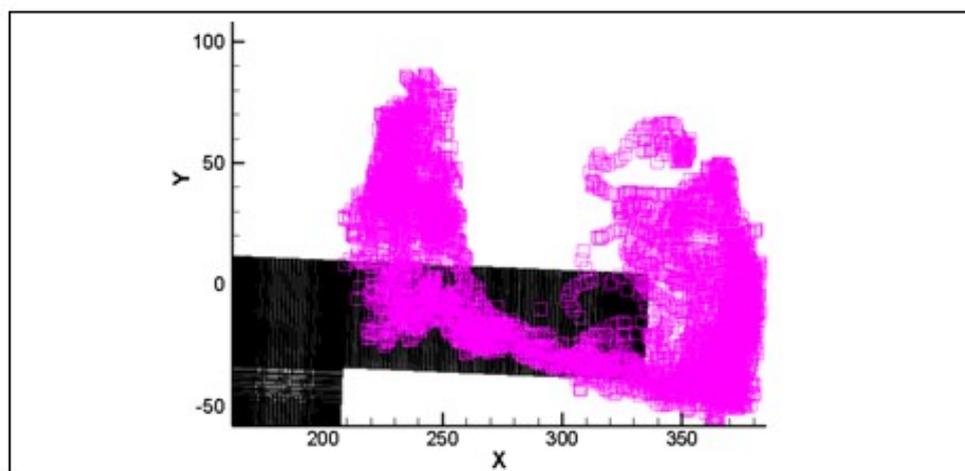
Os dados corrigidos das coordenadas de cada peixe foram trabalhados no programa *Microsoft Excel*. Porém, para que esses dados fossem reconhecidos pelo programa *TECLPLOT 360*, os dados foram salvos em formato texto “*txt*” e posteriormente salvo em formato “*dat*”.

Para visualizar o movimento individual de cada peixe, foi importado o arquivo de coordenadas de “*x*” e “*y*” em formato “*dat*” no programa *TECPLLOT*, Figura 49 (nos dados da cor roxa).

Nessa mesma figura, consegue-se visualizar também os dados hidrodinâmicos correspondentes ao canal de fuga que aparece na cor preta. Para isto, os dados hidrodinâmicos foram exportados no formato *TECPLLOT* do programa de simulação numérica computacional *ANSYS FLUENT*, logo do termino da simulação da malha de estudo. Foram exportadas as seguintes variáveis que, segundo a literatura explicariam o comportamento de peixes:

- Magnitude da velocidade;
- Magnitude da vorticidade;
- Energia turbulenta cinética ( $k$ );
- Taxa de dissipação de energia ( $\epsilon$ );
- Intensidade turbulenta;
- Magnitude da deformação hidráulica.

Figura 49 - Dados Hidrodinâmicos e Biológicos interpolados, antes da correção de coordenadas dos dados biológicos.

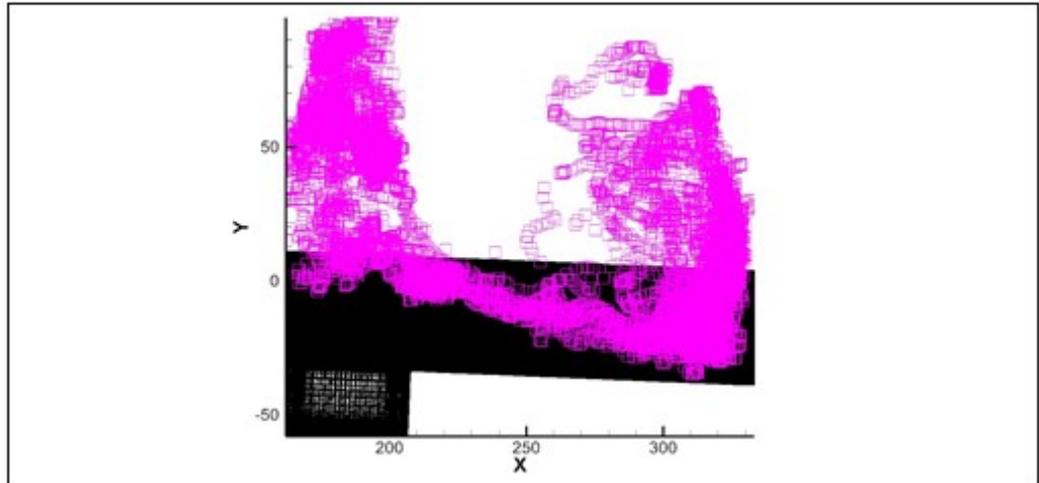


Legenda: Dados Hidrodinâmicos e Biológicos importados no programa *TECPLLOT 360*, sem ajuste de coordenadas “*x*” e “*y*” nos dados de Telemetria acústica (dados expressados em metros).

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

E o arquivo foi salvo no formato “dat”, para posteriormente ser aberto no programa *TECPLOT* 360, como mostra a Figura 50, para finalmente ambos dados serem interpolados.

Figura 50 - Dados Hidrodinâmicos e Biológicos interpolados, após a correção de coordenadas dos dados biológicos.



Legenda: Dados Hidrodinâmicos e Biológicos importados no programa *TECPLOT* 360, depois de fazer o ajuste de coordenadas “x” e “y” nos dados de Telemetria acústica (dados expressados em metros).

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 4.7.2.4 Ajuste dos dados de Altitude (Z) dos dados Biológicos

Para identificação de altitude (z) dos dados biológicos se obteve como referência o Hidrofone N°10, já que de acordo com Suzuki, (2014) (informação verbal)<sup>2</sup> esse Hidrofone se encontrava no ponto mais fundo do canal de fuga, a 12 metros de profundidade da lamina d’água. Por tanto, todas as coordenadas dos dados biológicos tinham como referência o Hidrofone N°10. Com relação aos dados de altitude (z) das medições feitas através da batimetria do rio, se localizou o posicionamento do Hidrofone N°10 e se calculou a elevação do fundo desse Hidrofone, da seguinte forma:

As coordenadas correspondentes ao posicionamento do Hidrofone 10 de “x” e “y” se subtraíram dos dois valores de coordenadas correspondentes a latitude (y) e longitude (x) da batimetria do rio (4.5.2.1) (FIGURA 51):

<sup>2</sup> Informação repassada em reunião via *online*, por Suzuki, (2014) em junho de 2016.

Figura 51 - Subtração dos dados de posicionamento do Hidrofone 10 e os dados de coordenadas de longitude e latitude da batimetria do rio:

Posição do Hidrofone 10		Batimetria do rio		Total subtração Posição Hidrofone 10 e Batimetria do rio	
x	y	x	y	x	y
472252.90	7986254.00	472033.936	7986234.303	218.964	19.697

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Posteriormente esse resultado foi subtraído do Total da subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos, das coordenadas “x” e “y” (4.5.2.3) (FIGURA 52):

Figura 52 - Subtração dos dados: Total subtração posicionamento Hidrofone 10 e batimetria do rio, subtraindo os valores do Total da subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos:

Total subtração Posição Hidrofone 10 e Batimetria do rio		Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos		Total subtração Posição Hidrofone 10 e Batimetria do rio e Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos	
x	y	x	y	x	y
218.964	19.697	52.18	-20.96	166.78	40.66

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Finalmente esse resultado foi somado na última correção de coordenada que foi feita dos 3 Hidrofones (4.5.2.2) (FIGURA 53):

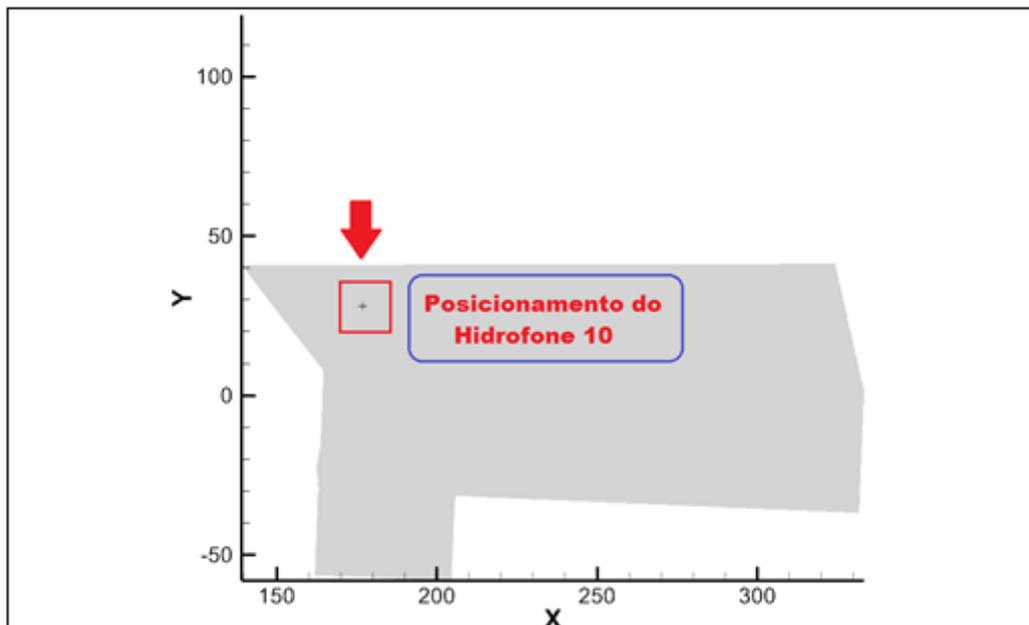
Figura 53 - Somatória dos dados: Total subtração posicionamento Hidrofone 10 e batimetria do rio com o total da subtração dos dados biológicos e hidrodinâmicos, mais os dados da correção dos Hidrofones.

Total subtração Posição Hidrofone 10 e Batimetria do rio e Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos		Correção (Hidrofones)		Total subtração Posição Hidrofone 10 e Batimetria do rio e Total da Subtração de dados Biológicos e Hidrodinâmicos, somando a Correção dos Hidrofones.	
x	y	x	y	x	y
166.78	40.66	1.43967	-0.5427	168.2241867	40.11603359

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Com esse dado final de coordenadas correspondente a altitude (z) ( $x = 168.22$ ;  $y = 40.12$ ), foi possível através do programa *TECPLOT 360*, ingressar essas coordenadas referentes aos dados biológicos e visualizar o posicionamento do Hidrofone N° 10 dentro dos dados Hidrodinâmicos da malha de estudo, com isto, se obteve o valor de altitude real do (z) = 509.15 com referência a esse Hidrofone (FIGURA 54):

Figura 54 - Posicionamento do Hidrofone 10 perto do canal de fuga. Os dados foram visualizados no programa *TECPLOT 360*.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Posteriormente esse dado de altitude (z) foi somado em cada coordenada de (z) no arquivo Excel, correspondente a cada peixe (FIGURA 55):

Figura 55 - Correção de coordenada “z” nos dados biológicos, correspondente a cada peixe.

“Z” do Peixe (Dado da Telemetria acústica)	“Z” do Hidrofone 10 (Dado obtido através da Batimetria do rio)	“Z” Corrigido Final (Para cada dado de Z de cada Peixe)
14.32	509.15	523.47

Legenda: Exemplo do primeiro dado de “z” do Peixe código 3322 no mês de Novembro).

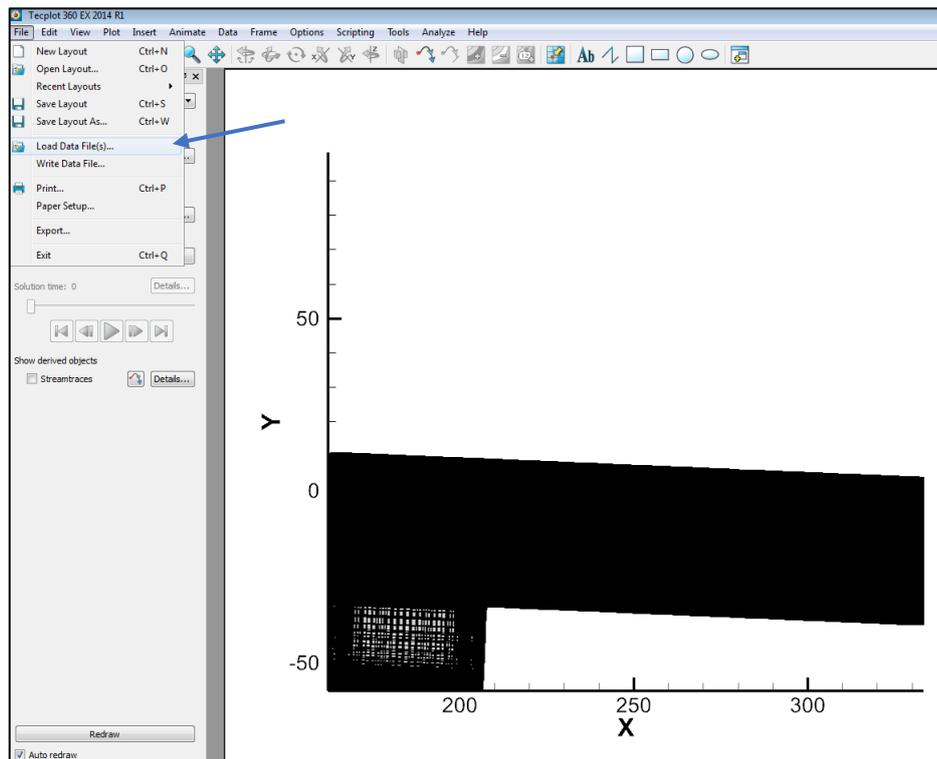
Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 4.8 Obtenção dos dados hidrodinâmicos junto com os dados biológicos.

Para a obtenção dos dados conjuntos (hidrodinâmicos e biológicos), foram seguidos os seguintes passos:

1. Foi aberto o arquivo em formato “dat” do canal de fuga (dados hidrodinâmicos) no programa *TECPLOT* 360-2014 (como *tecplot data loader*)

Figura 56 - Canal de fuga no programa *TECPLOT* 360 -2014.

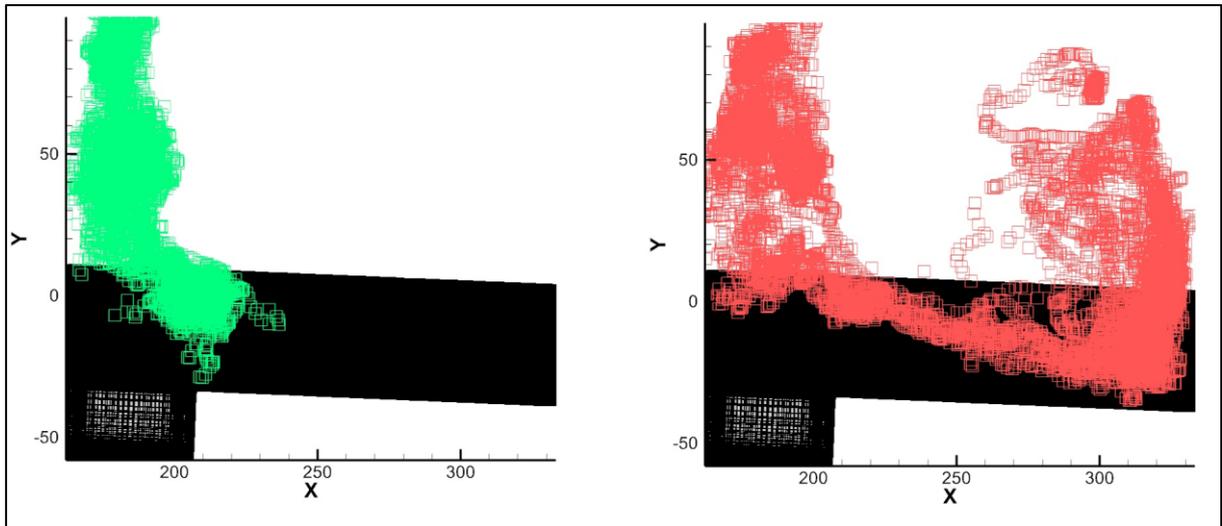


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

2. Logo, foram adicionados os dados de cada peixe no formato “dat” de forma individual, no programa *TECPLOT* 360-2014 (como *tecplot data loader*). Junto ao canal de fuga, como mostra a Figura 57 e a Figura 58.

Foram geradas as imagens do posicionamento dos peixes que serão utilizados nos resultados como exemplo, para as espécies de peixe *Prochilodus argenteus* (*curimatã*) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (*mandi amarelo*) código 5296 dentro do canal de fuga, nos meses de novembro e dezembro 2011. Essas espécies foram as mais representativas em questão de dados de medição.

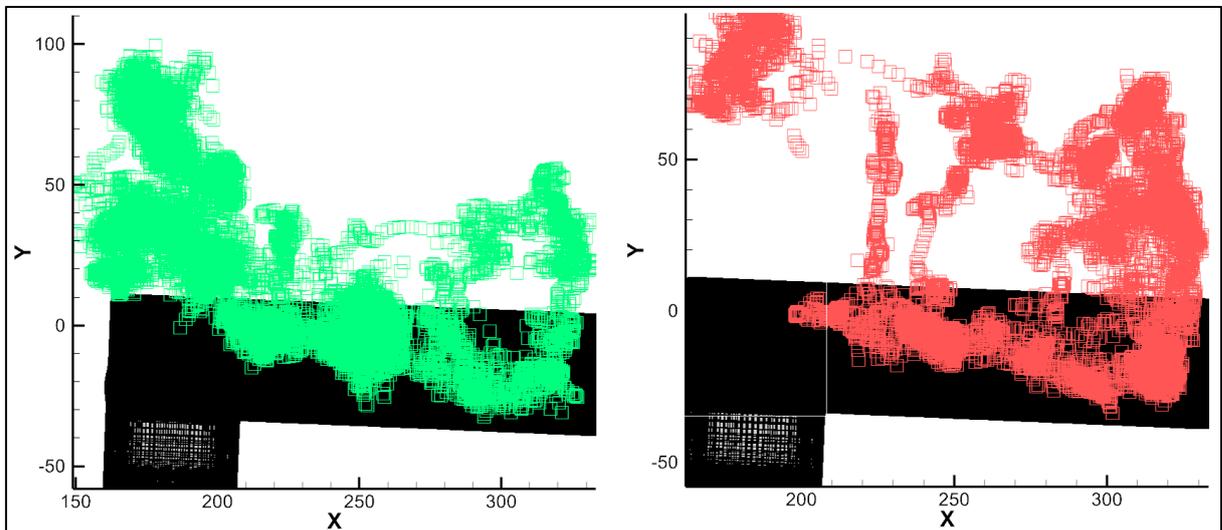
Figura 57 - Posicionamento do Peixe *Prochilodus argenteus* (curimatã) código 3322 perto do Canal de Fuga da Central Hidrelétrica de Três Marias.



Legenda: Primeira imagem na esquerda são os dados de posicionamento do peixe no mês de novembro e segunda imagem a direita são os dados de posicionamento do peixe no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Figura 58 - Posicionamento do Peixe *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296 perto do Canal de Fuga da Central Hidrelétrica de Três Marias.

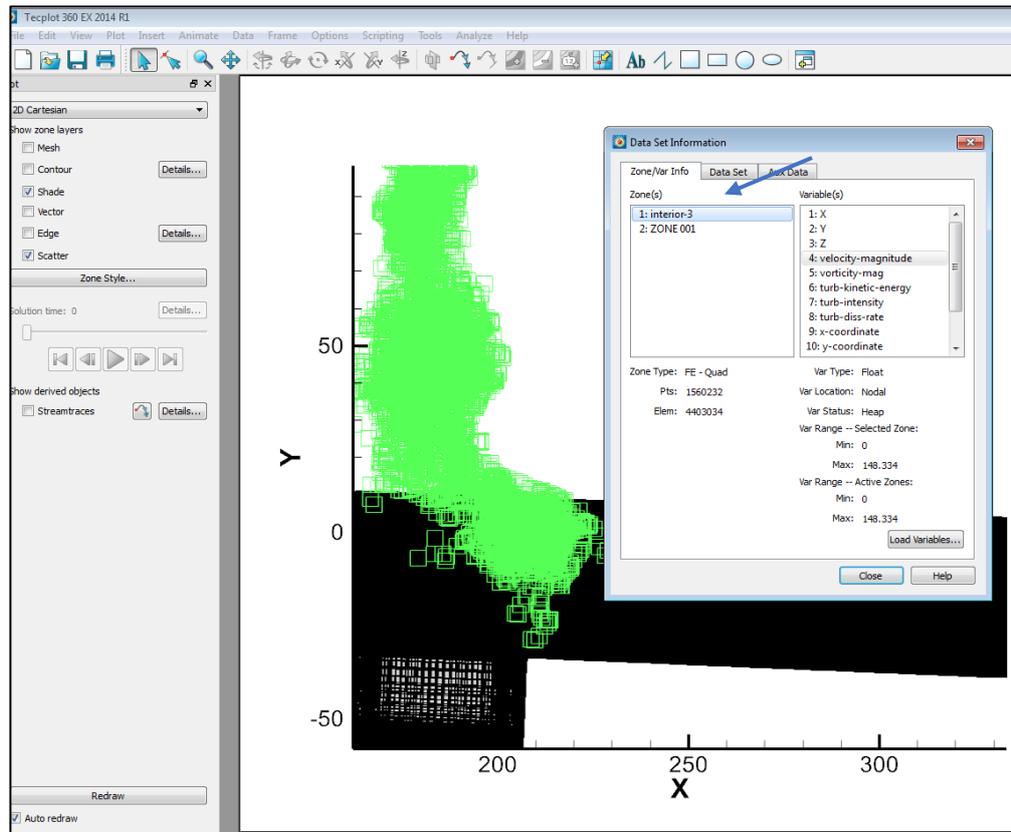


Legenda: Primeira imagem na esquerda são os dados de posicionamento do peixe no mês de novembro e segunda imagem a direita são os dados de posicionamento do peixe no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

3. Após ter ambos dados abertos, na opção “*data set info*” foram confirmadas as variáveis que foram exportadas do programa “*FLUENT*”. Magnitude da Velocidade; Magnitude da Vorticidade; Energia Cinética de Turbulenta (k); Intensidade Turbulenta; Dissipação de Energia ( $\epsilon$ ); Magnitude da deformação Hidráulica (FIGURA 59).

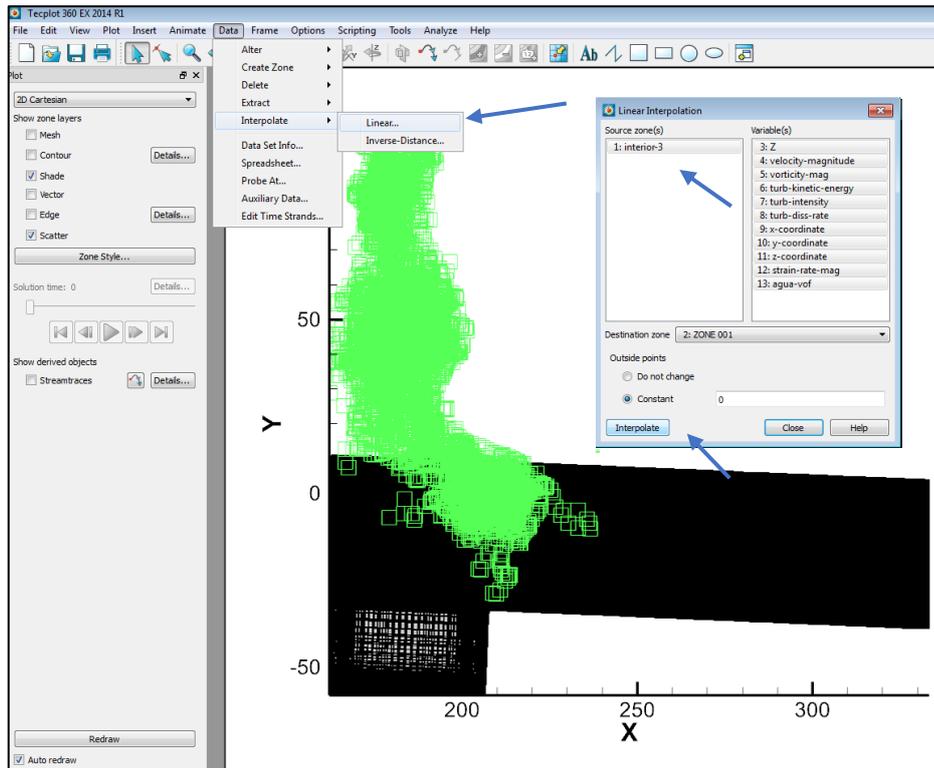
Figura 59 - Observação das variáveis exportadas no programa *TECPLOT 360 -2014*.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

- Depois foi feita a interpolação de ambos dados. Para isto, no programa *TECPLOT 360-2014* selecionou-se a opção “data”-“interpoliar”-“linear”. Onde foi marcada a zona “interior” (correspondente ao canal de fuga) junto com todas as variáveis que serão analisadas (mencionadas no ponto anterior) e se definiu a zona 01 (correspondente aos dados do peixe), finalizando na opção “interpoliar”, onde os dados foram interpolados. (FIGURA 60)

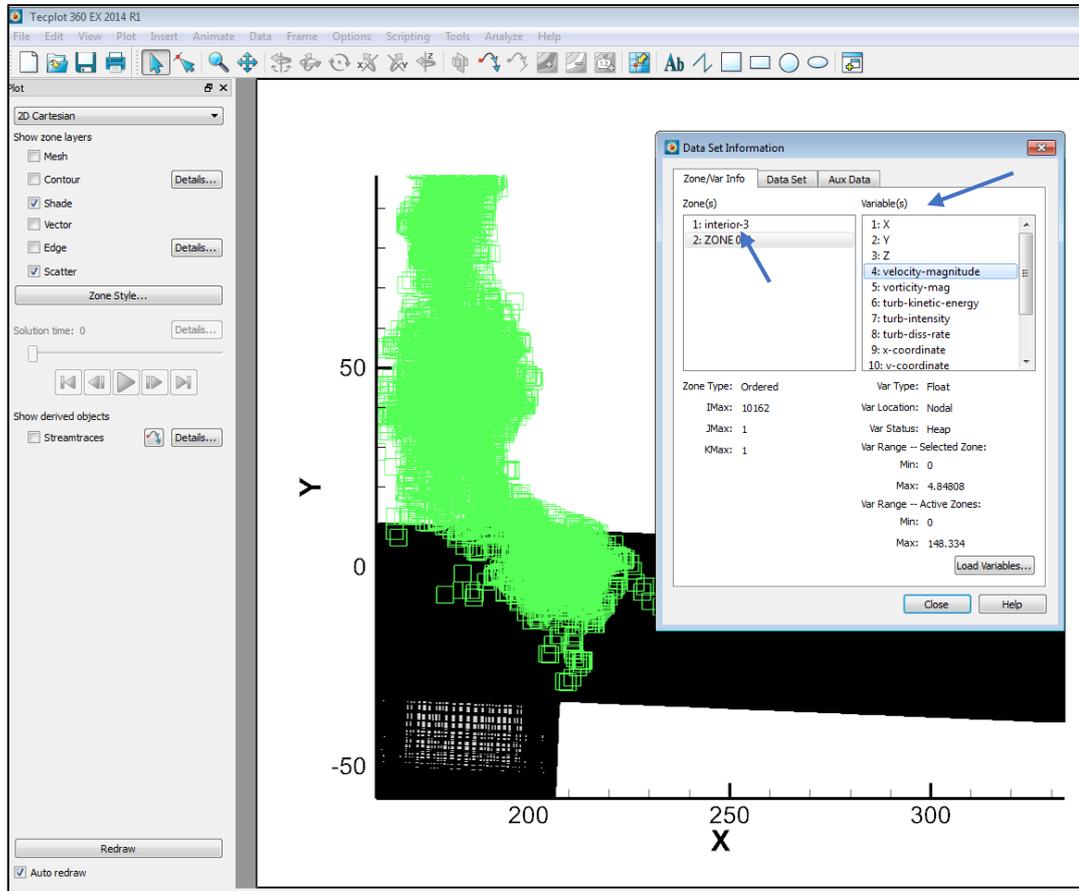
Figura 60 - Interpolação dos dados no programa *TECPLOT* 360 -2014.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

5. Uma vez interpolados os dados, na opção do programa “*data set info*”, foi possível observar os novos dados, de acordo a cada variável estudada (FIGURA 61)

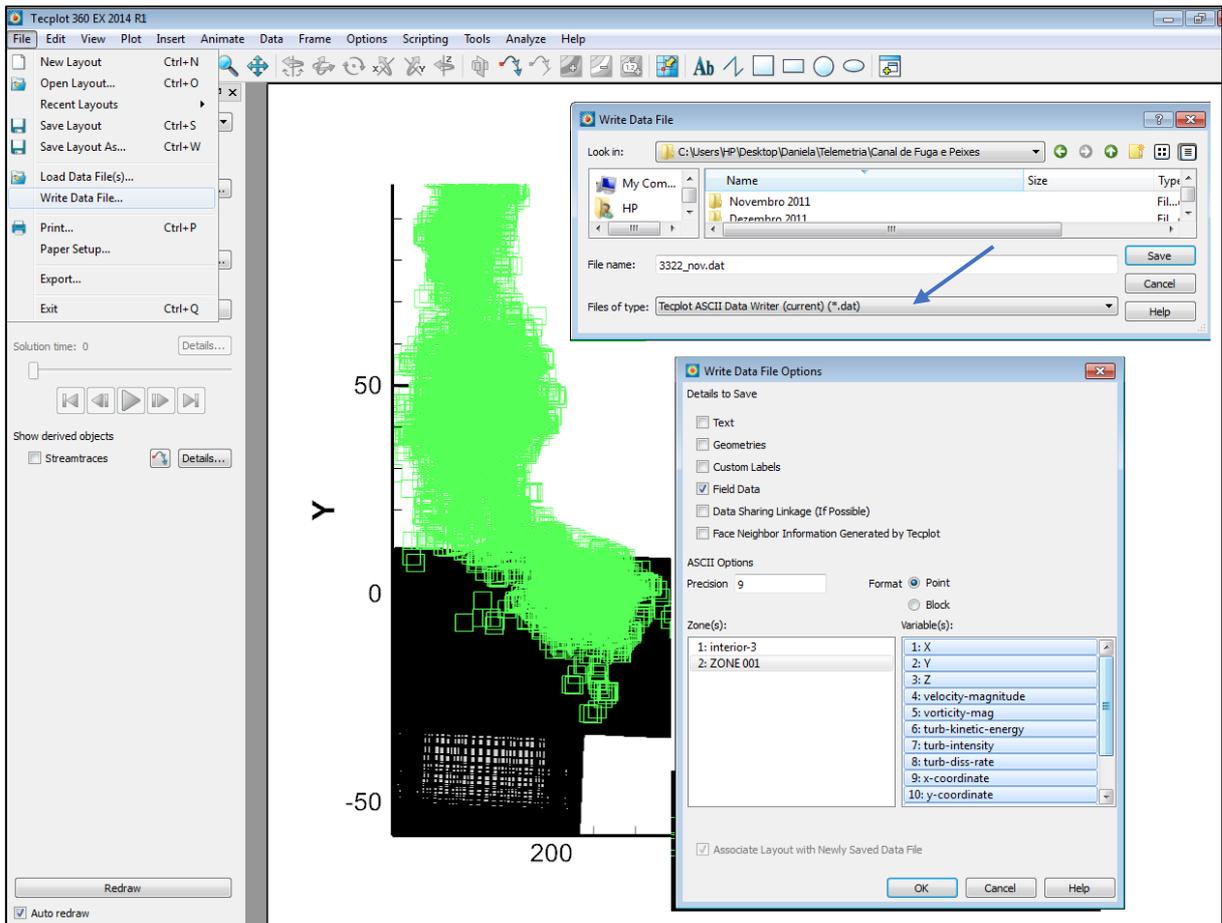
Figura 61 - Dados interpolados e observação das variáveis estudadas, no programa *TECPLOT 360 -2014*.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

6. Para visualização de todos os dados analisados, foram exportados do programa *TECPLOT 360-2014* para o formato Excel (como arquivo “dat”). Para isto, selecionou-se a opção “File”-“write data file”; salvar no formato “*Tecplot ASCII Data Writer (current) (dat)*”, logo se marcaram as seguintes opções: “*Field data*”- “*Format point*”- Zona 01 e finalmente selecionou-se todas as variáveis a exportar. Observar Figura 62:

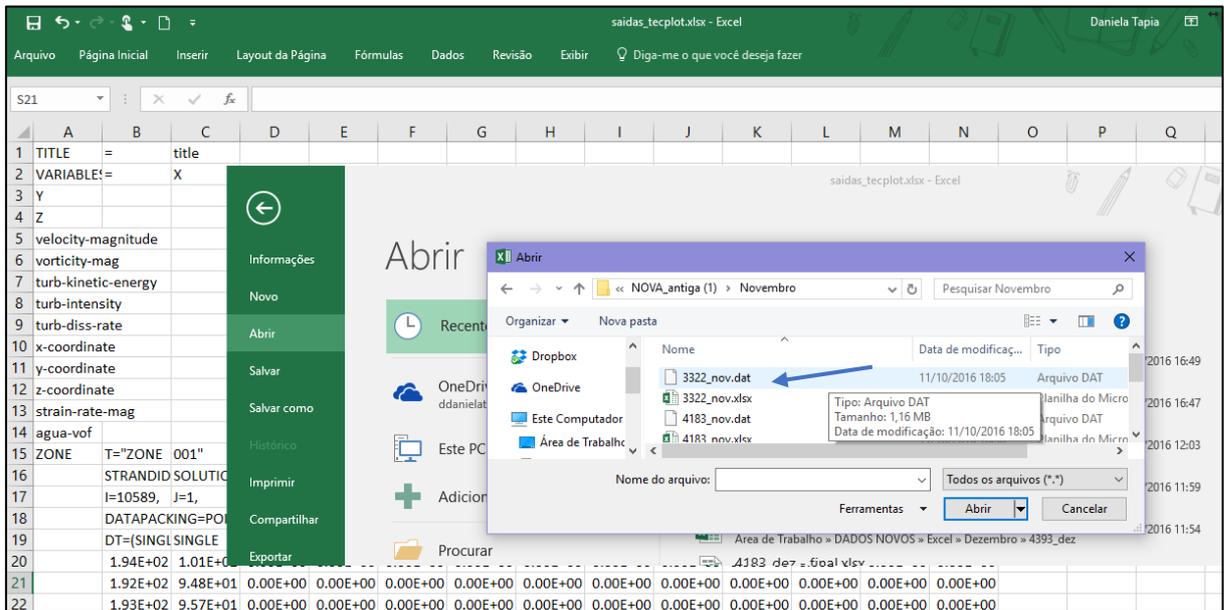
Figura 62 - Dados exportados para o formato Excel desde o programa *TECPLOT 360 -2014*.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

7. Uma vez exportados todos os dados do programa *TECPLOT 360-2014* (no formato dat). Foi aberto o programa Excel para trabalhar os dados. Para isto, foi necessário:
  - a) Abrir o documento (dat) no programa Excel (FIGURA 63)

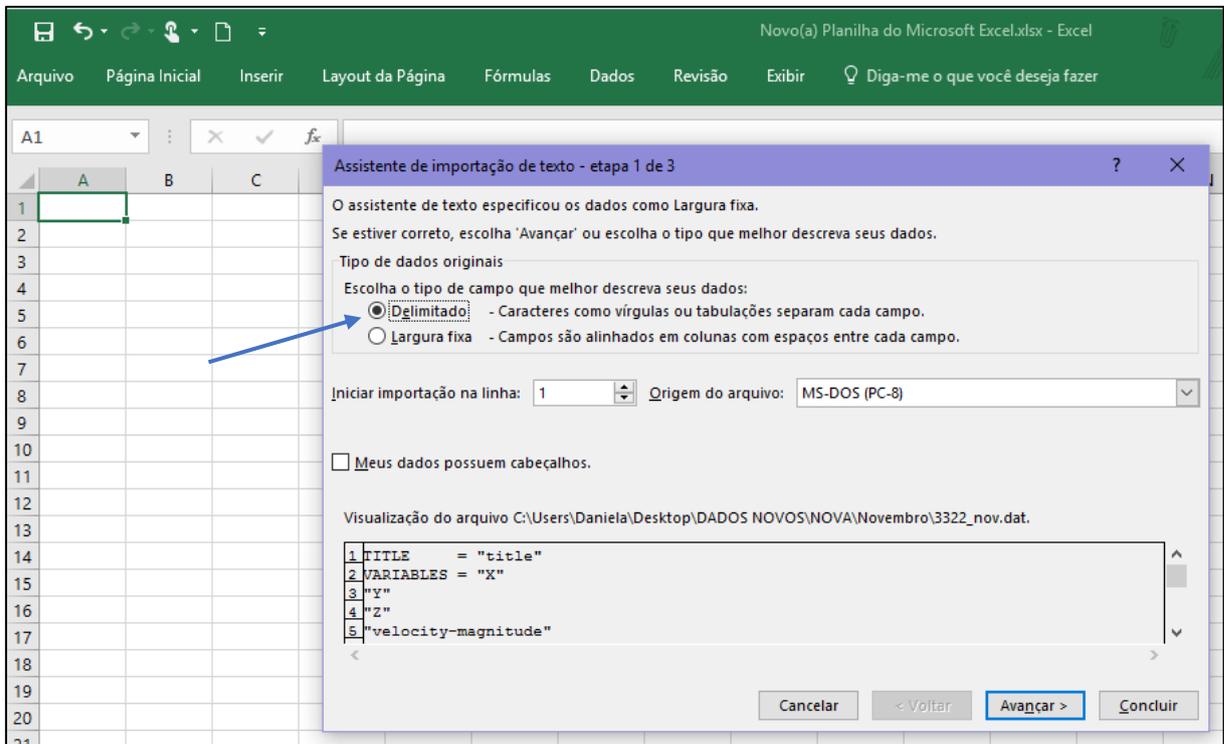
Figura 63 - Arquivo no formato (dat), importado para o programa Excel 2016.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

- b) Selecionar o combo “delimitado”, onde os caracteres como vírgulas ou tabulações separam cada campo (FIGURA 64)

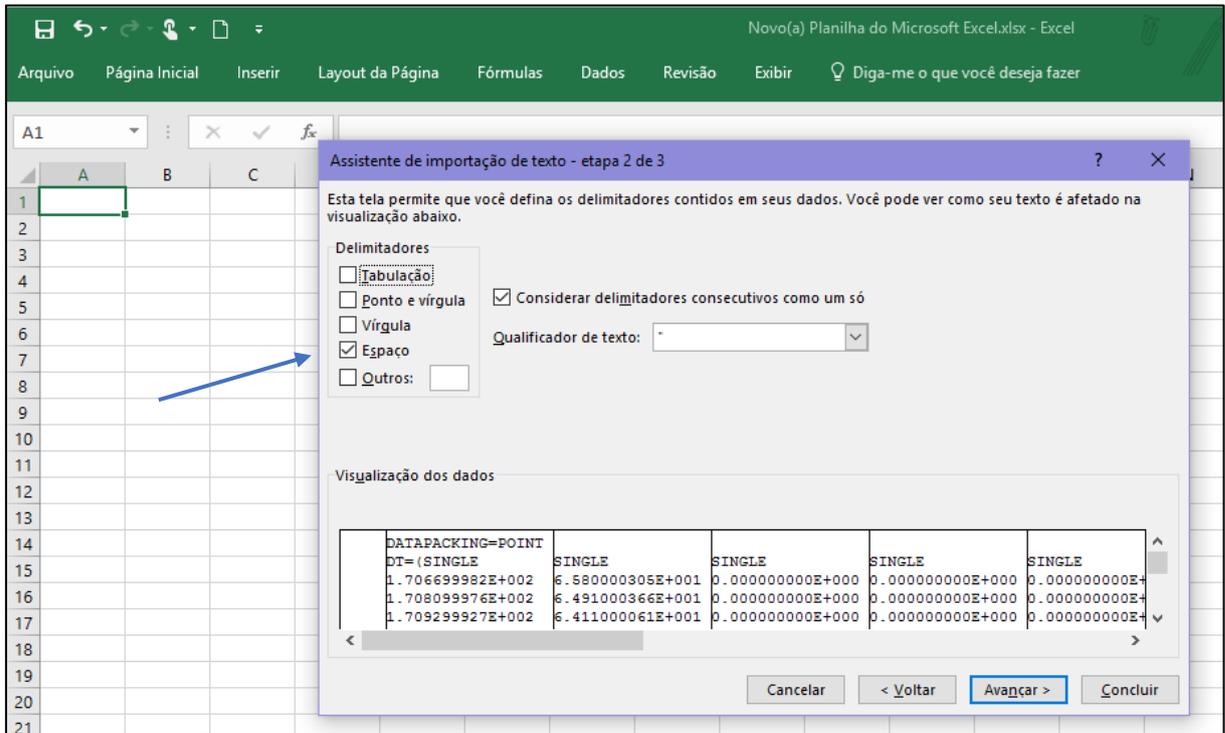
Figura 64 - Opções para importação do arquivo “dat”. (Delimitado).



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

- c) Na seguinte etapa selecionou-se o delimitador dos dados, na opção “espaço”, assim todas as colunas ficam separadas com seus dados de forma independente (FIGURA 65)

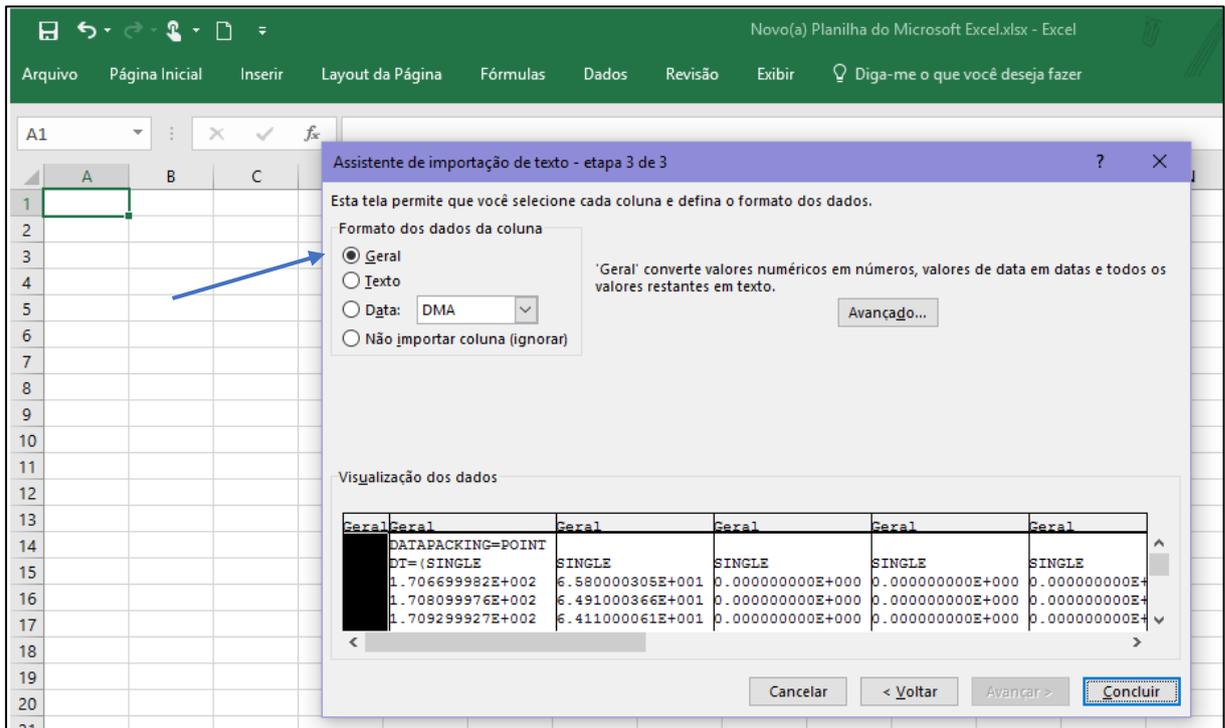
Figura 65 - Opções para importação do arquivo “dat”. Delimitador de dados (Espaço)



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

- d) Finalmente o formato dos dados das colunas se marcou como “geral” (FIGURA 66)

Figura 66 - Opções para importação do arquivo “dat”. Delimitador de dados (Espaço)



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

- Uma vez que todos dados (por peixe) foram importados no programa Excel, selecionando todas as opções descritas anteriormente, logrou-se visualizar os dados, para isto, também foi necessário fazer algumas modificações, como: Colocar nome a cada coluna, para identificação dos dados e mudar o formato dos dados que estavam em “científico”, para “número”, utilizando só 2 decimais, como indica a Figura 67 e 68:

Figura 67 - Dados importados do programa *TEC PLOT 360-2014* no programa Excel. Identificação das variáveis para cada coluna.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	TITULO	=	title											
2	VARIÁVEL	=	X											
3			Y											
4			Z											
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15	ZONA	T="ZONE	001"											
16		STRANDIC	SOLUTIONTIME=0											
17		I=10162,	J=1,	K=1,	ZONETYPE=Ordered									
18		DATA	PACKING=POINT											
19		DT=(SINGI	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE
20					Velocidade e Magnitude	Vorticidade e Magnitude	Energia Cinética Turbulencia (k)	Intensidade Turbulenta	Dissipação de Energia (e)	x-coordenada	y-coordenada	z-coordenada	Magnitude da taxa de deformação	Volume de Fração da água (água-vof)
21		X	Y	Z										
22		1.71E+11	6.58E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
23		1.71E+11	6.49E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
24		1.71E+11	6.41E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
25		1.70E+11	6.29E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
26		1.70E+11	5.70E+10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

Figura 68 - Dados importados do programa *TEC PLOT 360-2014* no programa Excel. Seleção dos dados do formato “científico”, para o formato “número” (utilizando só 2 decimais).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
3			Y											
4			Z											
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15	ZONA	T="ZONE	001"											
16		STRANDIC	SOLUTIONTIME=0											
17		I=10162,	J=1,	K=1,	ZONETYPE=Ordered									
18		DATA	PACKING=POINT											
19		DT=(SINGI	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE	SINGLE
20					Velocidade e Magnitude	Vorticidade e Magnitude	Energia Cinética Turbulencia	Intensidade Turbulenta	Dissipação de Energia (e)	x-coordenada	y-coordenada	z-coordenada	Magnitude da taxa de deformação	Volume de Fração da água (água-vof)
21		X	Y	Z										
22		170.67	65.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23		170.81	64.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24		170.93	64.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25		170.46	62.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26		170.43	56.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27		170.41	52.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.



selecionou a coluna do eixo “z”, se ordenaram os dados de forma crescente, se utilizou a ferramenta de filtro, se eliminaram os valores de zero, eliminando também todos os outros dados das variáveis que se encontravam junto com esses valores de zero (0.00).

12. Por último, mesmo procedimento descrito anteriormente, foi aplicado para a coluna onde se encontravam os dados de Volume de Fração da água (água-vof), onde foram eliminados todos os dados menores a 0,5.
13. Finalmente se obteve uma planilha final no programa Excel, por cada peixe, com os dados filtrados e referentes somente aos dados correspondentes dentro do canal de fuga.

#### **4.9 Obtenção dos resultados extraídos do software “STATISTICA”.**

Para obter os resultados comparativos dos peixes, foi utilizado o software *Statistica* 8.0.360. Para isto, os passos foram os seguintes:

##### **4.9.1 Teste de Normalidade**

Verificar a normalidade em um conjunto de dados é importante para poder avaliar o comportamento desses dados, ou seja, determinar a forma que a distribuição assume, avaliando se a mesma se aproxima da gaussiana (em forma de sino). A vantagem de se ter uma distribuição normal é que os dados são muito mais poderosos, eles são homogêneos e conseguem explicar muito melhor os dados.

Assumir a normalidade dos dados que se estão trabalhando é uma forma de simplificar a análise, para isto, nesse trabalho se considerou a utilização do teste *Kolmogorov-Smirnov*. Adotou-se que a distribuição normal para os testes que apresentaram p-valor inferior a 5% ( $< 0,05$ ).

##### **4.9.2 Teste de *Duncan***

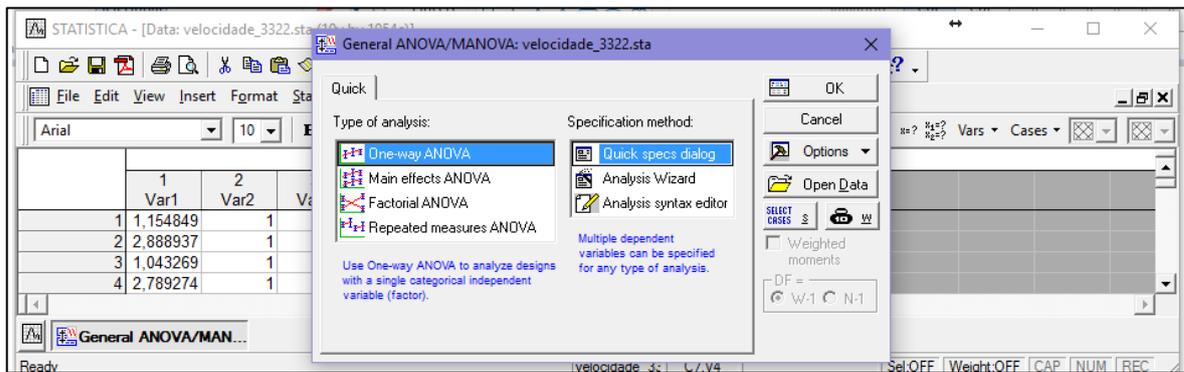
Foi utilizado o método de comparação de médias, chamado “*Duncan*”. Este teste tem como característica principal a comparação das medias duas a duas. Este teste entrega resultados mais discriminados.

##### **4.9.2.1 Comparação do mesmo peixe no mês de Novembro e Dezembro.**

Para realizar o Teste de *Duncan* foi utilizado o programa “*Statistica*”, seguindo os seguintes passos:

- a) Gerou-se uma planilha com os dados de cada variável de forma independente, por peixe. Para isto, na primeira coluna, se copiaram os dados de uma variável, no mês de novembro e no mês de dezembro, de um peixe, logo na segunda coluna, definiu-se um número para identificar a qual mês correspondia os dados da variável. Foi definido para o mês de novembro o número (1) e para o mês de dezembro o número (2).
- b) Depois selecionou-se a aba “*Anova/one way anova*” para selecionar as variáveis (FIGURA 70).

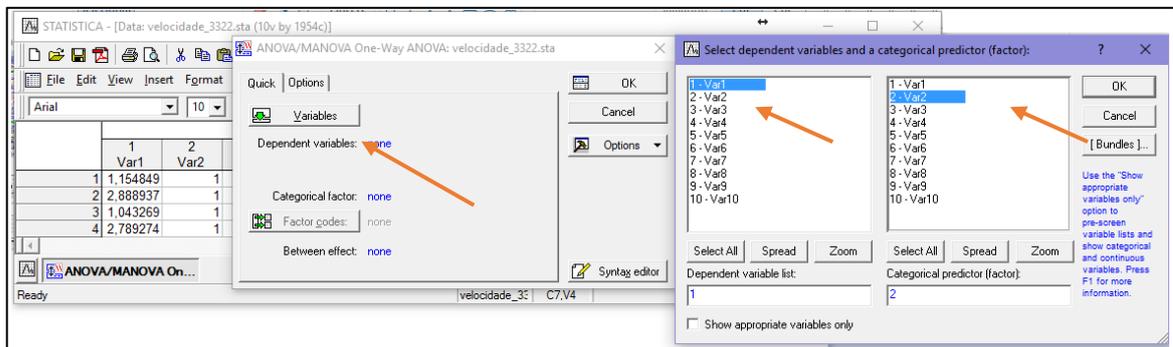
Figura 70 - Exemplo das variáveis de velocidade do mês de novembro e dezembro para o peixe 3322, na planilha do programa “*Statistica*” na opção “*Anova*”.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

- c) Logo, foi selecionada a Variável (1) como variável dependente e a Variável (2) como “*grouping*” (FIGURA 71).

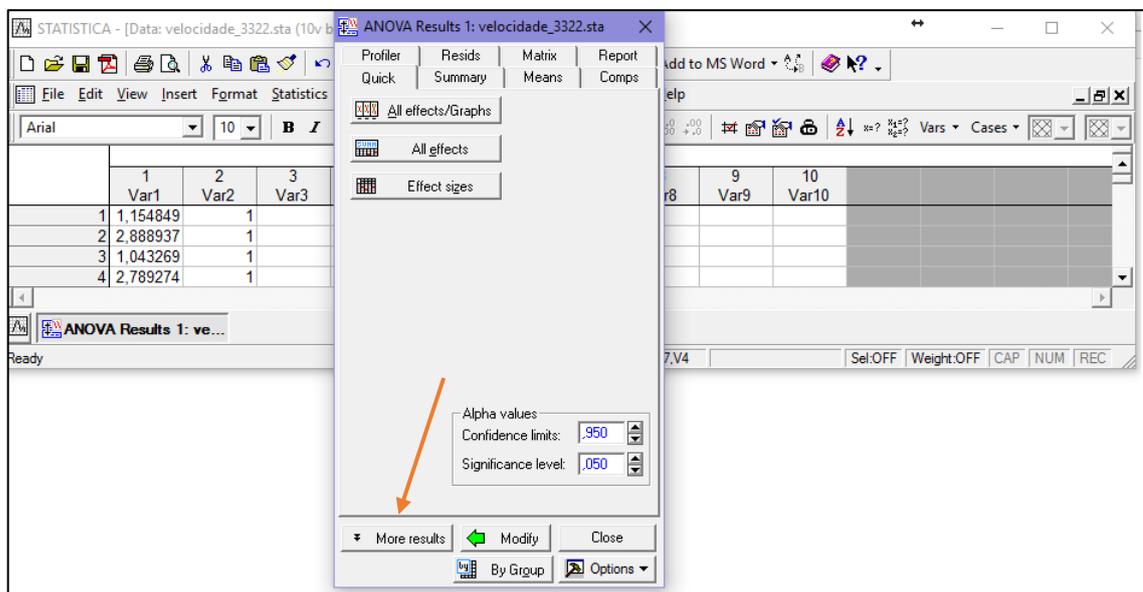
Figura 71 - Seleção das variáveis correspondentes ao peixe 3322 no programa “*Statistica*”, depois da opção “*one way anova*”



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

d) Uma vez selecionadas as variáveis, se abriu uma janela, onde foi selecionada a aba “*more results*” (FIGURA 72)

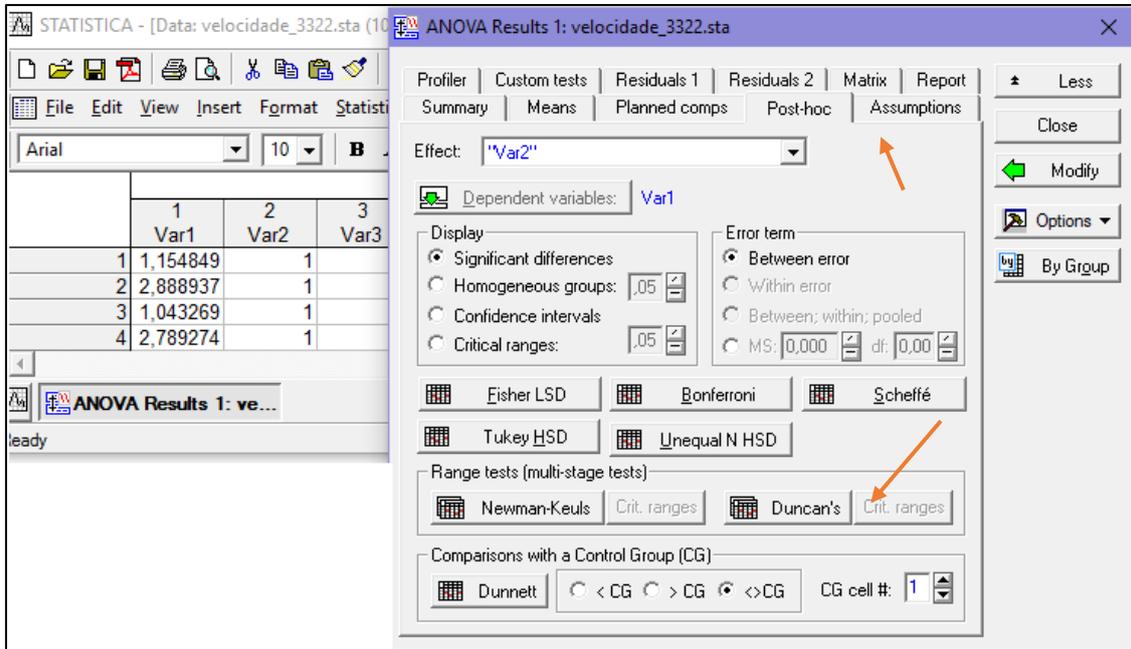
Figura 72 - Seleção da aba “*more results*” no programa “*Statistica*”.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

e) Foi selecionada a opção “*Post-hoc*” e logo a opção “*Duncan*” (FIGURA 73)

Figura 73 - Seleção da opção “*Duncan*” no programa “*Statistica*”.

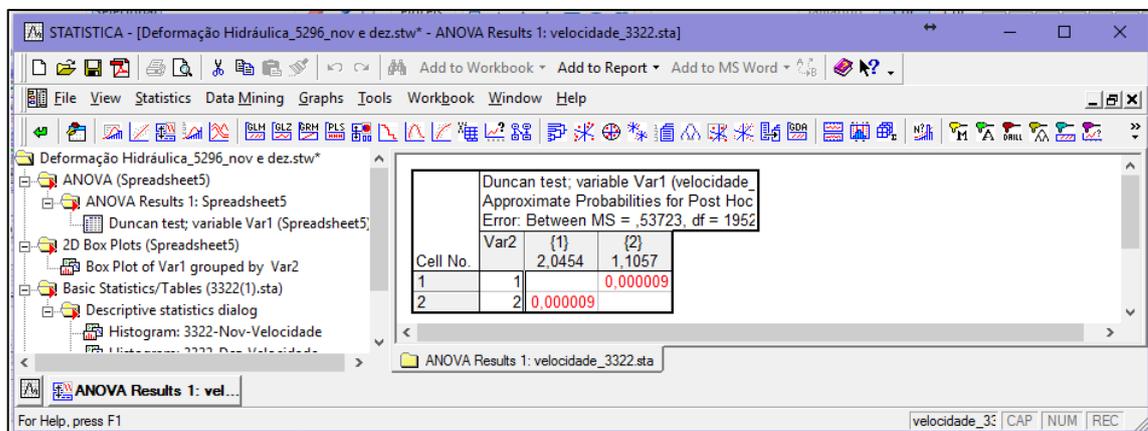


Fonte:

AUTORIA PROPRIA, 2016

f) Selecionada a opção anterior, o programa entrega os valores do teste de Duncan (FIGURA 74)

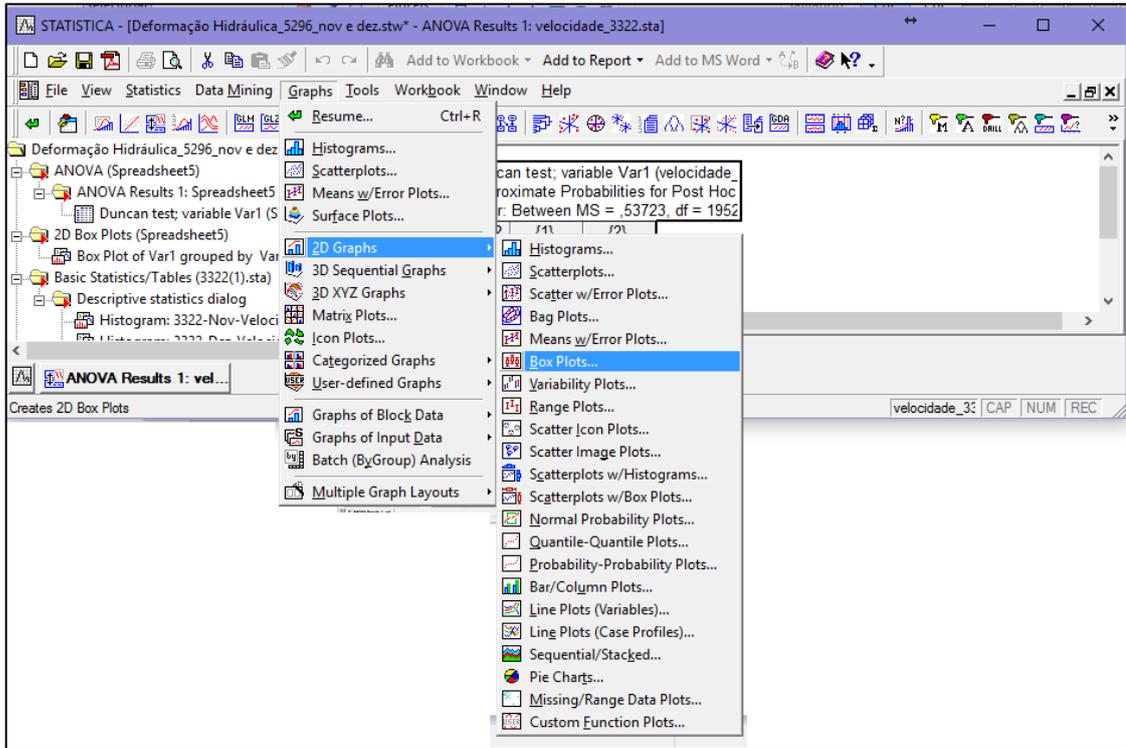
Figura 74 - Resultado dos valores “*Duncan*” para as duas variáveis de velocidade no mês de novembro e dezembro do peixe 3322, no programa “*Statistica*”.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

g) Para ver esses resultados de forma gráfica, foi selecionada a opção “*Graphs/2D/Box plot*” (Figura 75)

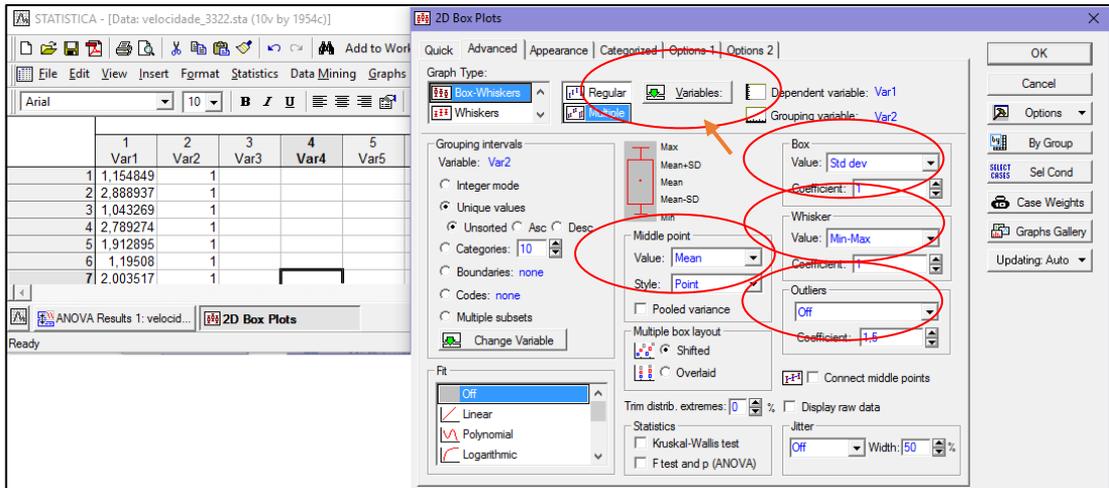
Figura 75 - Opção “*Graphs/2D/Box plot*” no programa “*Statistica*”, para o teste *Duncan*.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

h) Na aba “*Advance*” foram selecionadas as seguintes opções: Seleção das variáveis (variável dependente (1) e variável (2) *grouping*); *Middle point (Mean)*; *Box (Std dev, coefficient 1)*; *Whisker (Min-Máx, coefficient 1)*; *Outliers (off)*. (FIGURA 76)

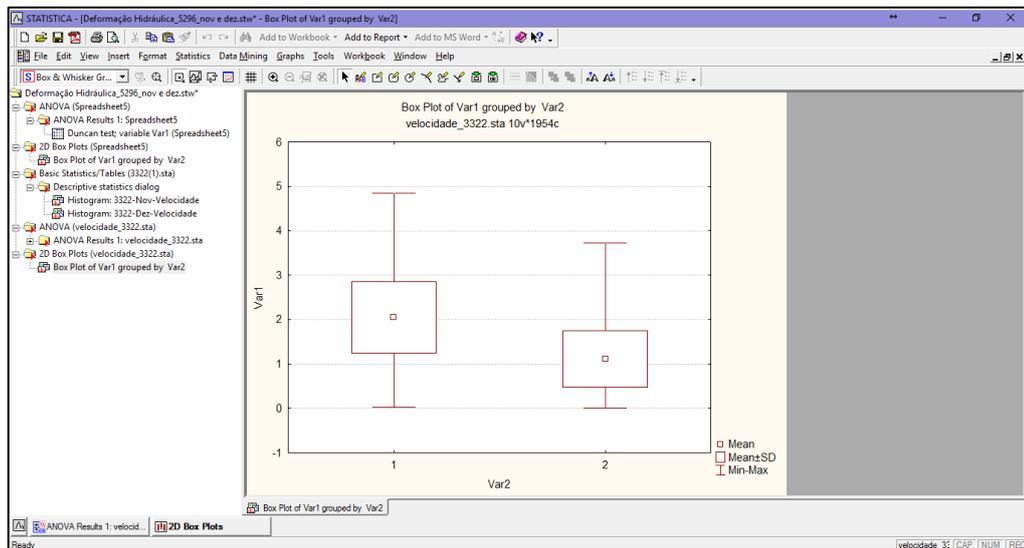
Figura 76 - Opções selecionadas na aba “Advance” no programa “Statistica”, para geração do gráfico, correspondente ao teste *Duncan*.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

- i) Finalmente o programa entrega o Gráfico comparando as variáveis selecionadas (FIGURA 77)

Figura 77 - Gráfico comparando as variáveis de velocidade do mês de novembro e dezembro, correspondente ao peixe 3322, do teste *Duncan*, no programa “Statistica”.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

#### **4.9.2.2 Comparação entre ambos peixes, por mês de forma independente.**

Para obter os resultados do Teste de *Duncan*, comparando ambas espécies de peixes por mês, o comparativo se realizou da mesma forma que no comparativo anterior (4.9.2.1), com a diferença, que neste procedimento, se compararam as variáveis hidráulicas em um mês (novembro e dezembro por separado), porém entre as duas espécies de peixes: *Prochilodus argenteus* (curimatã) código 3322 e o *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Convergência da simulação numérica computacional

O tempo gasto na simulação numérica correspondente à primeira malha de estudo (Canal de Fuga) foi de 108 dias, começando o dia 20 de maio a 20 de setembro de 2016, totalizando 22.800 iterações. As outras duas malhas que também estavam simulando, foram desconsideradas, pelo tempo gasto computacional.

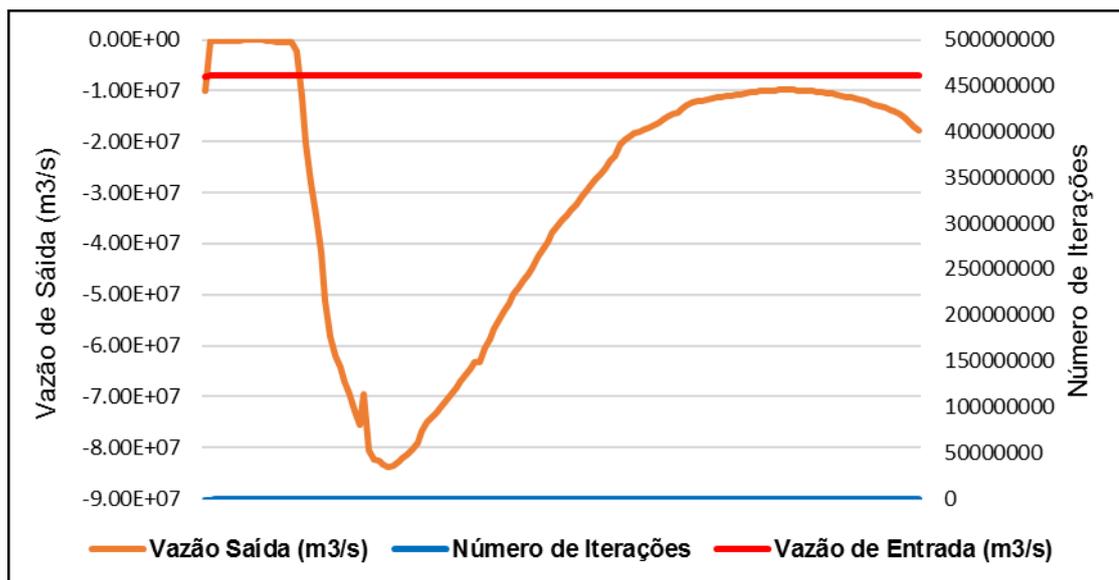
A vazão de entrada no domínio, considerando as 5 turbinas foi de  $461 \text{ m}^3/\text{s}$  e a vazão de saída obtida na última iteração foi de  $179 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A convergência mássica, isto é a vazão de entrada ser igual a vazão de saída, demanda um tempo computacional consideravelmente elevado.

Neste trabalho, a convergência da simulação não foi atingida, uma vez que seria exigido mais tempo de simulação numérica.

Na Figura 78 mostra a monitoramento da vazão ao longo da simulação numérica da malha de estudo.

Figura 78 - Gráfico de convergência de vazão mássica no setor de saída da malha de estudo.



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

## 5.2 Comparação dos dados dos peixes extraídos no software “STATISTICA”

### 5.2.1 Teste de Normalidade

Os testes de normalidade apontaram distribuição normal para todas as variáveis hidráulicas testadas.

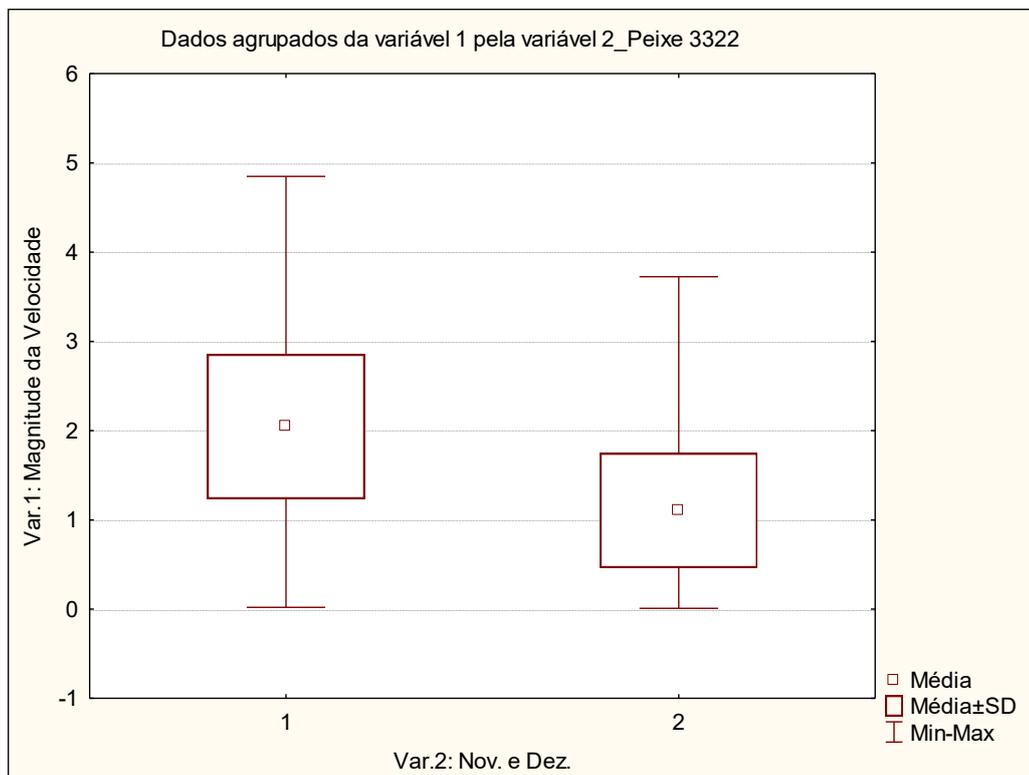
### 5.2.2 Teste de Duncan: Comparação das variáveis hidráulicas por peixe no mês de novembro e dezembro.

#### 5.2.2.1 Resultados da espécie de peixe *Prochilodus argentus* (curimatã), comparativo entre os meses de novembro e dezembro.

##### 5.2.2.1.1 Variável Hidráulica “Magnitude da Velocidade”.

Para a espécie curimatã, no mês de novembro e dezembro, avaliando a variável hidráulica de Magnitude da Velocidade, se observou diferenças significativas. Assim, o peixe preferiu uma magnitude de velocidade diferente entre esses meses, segundo o visualizado na Figura 79.

Figura 79 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Velocidade do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro.

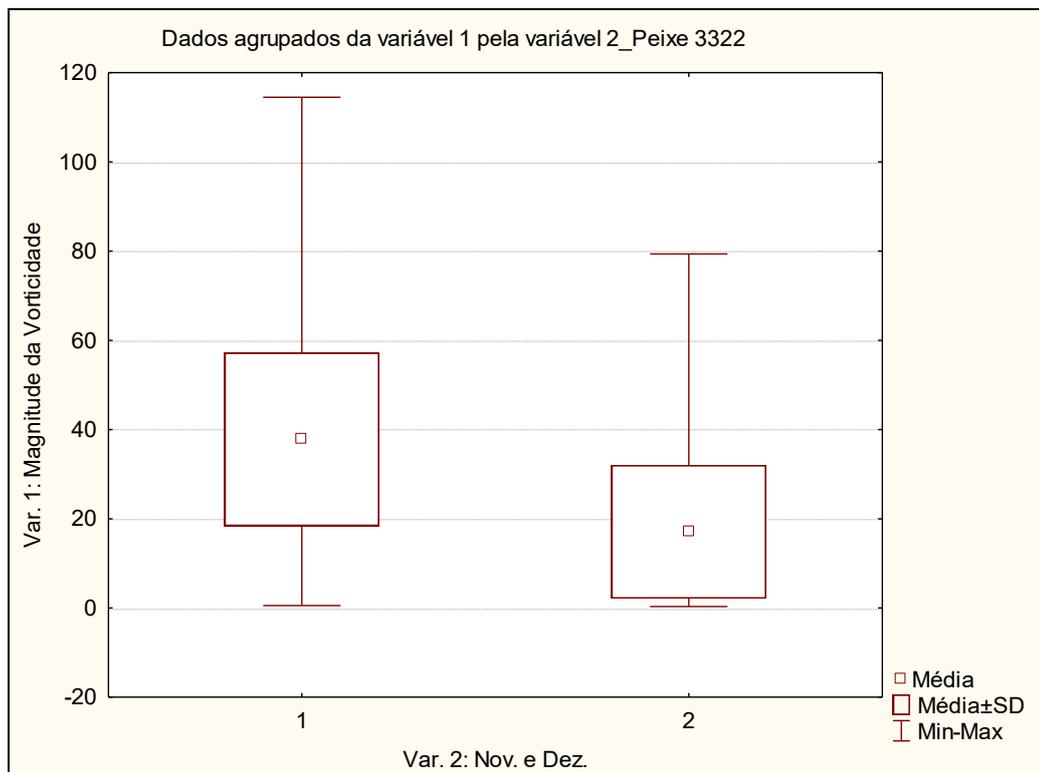


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

### 5.2.2.1.2 Variável Hidráulica “Magnitude da Vorticidade”.

Para a variável hidráulica de Magnitude da Vorticidade, também se obteve diferenças significativas. Assim o peixe preferiu uma magnitude de vorticidade diferente entre o mês de novembro e dezembro (FIGURA 80).

Figura 80 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Vorticidade do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro.

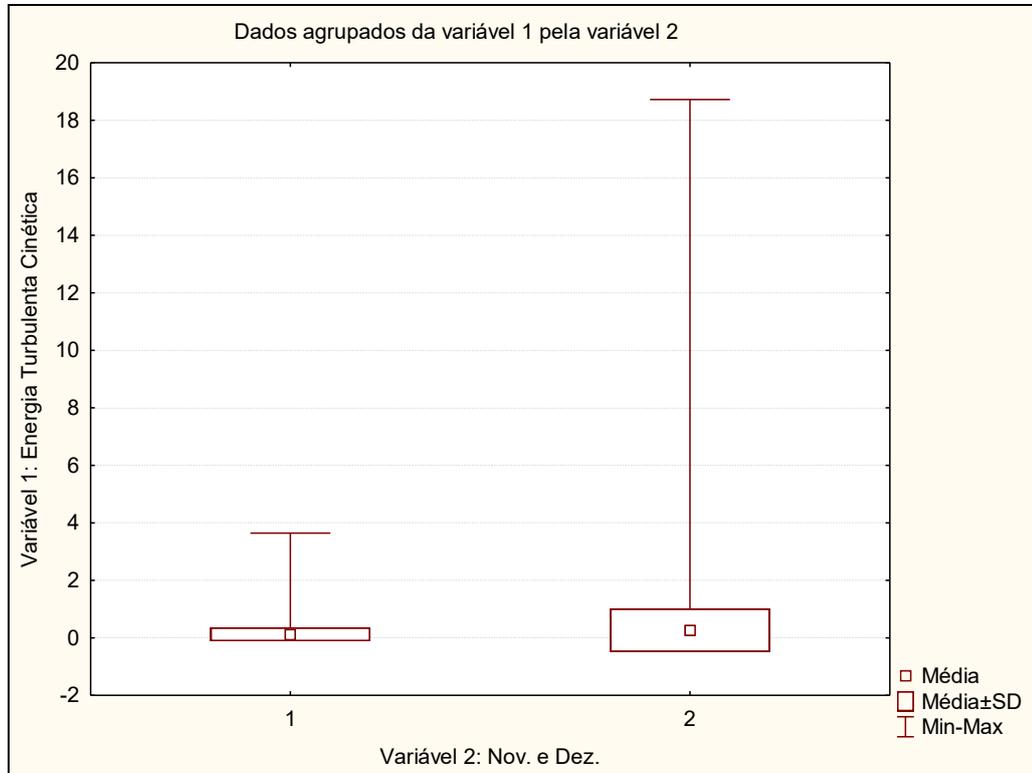


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

### 5.2.2.1.3 Variável Hidráulica “Energia Turbulenta Cinética”.

Para a variável hidráulica correspondente a Energia Turbulenta Cinética, houveram diferenças significativas no mês de novembro e dezembro. Assim, o peixe preferiu uma Energia Turbulenta Cinética diferente entre ambos meses (FIGURA 81).

Figura 81 - Gráfico comparativo da variável Energia Turbulenta Cinética do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro.

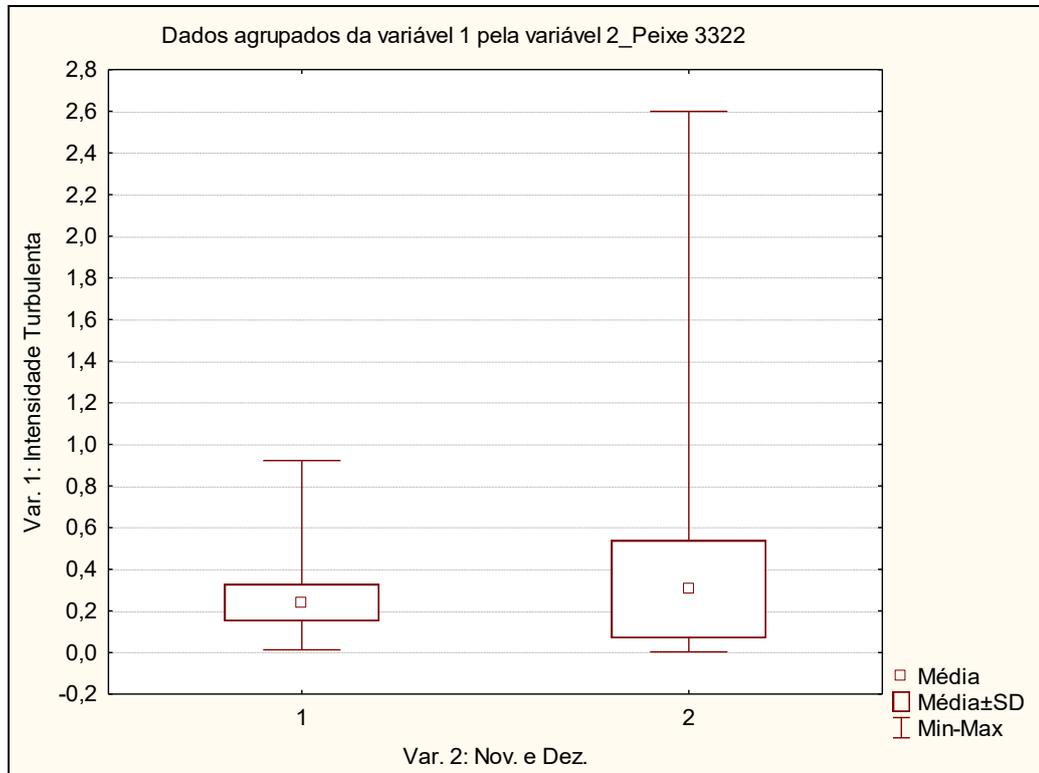


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.1.4 Variável Hidráulica “Intensidade Turbulenta”.

Para a variável hidráulica correspondente a Intensidade Turbulenta, obteve-se também diferenças significativas no mês de novembro e dezembro e o peixe preferiu uma Intensidade turbulenta diferente entre ambos meses (FIGURA 82).

Figura 82 - Gráfico comparativo da variável Intensidade Turbulenta do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro.

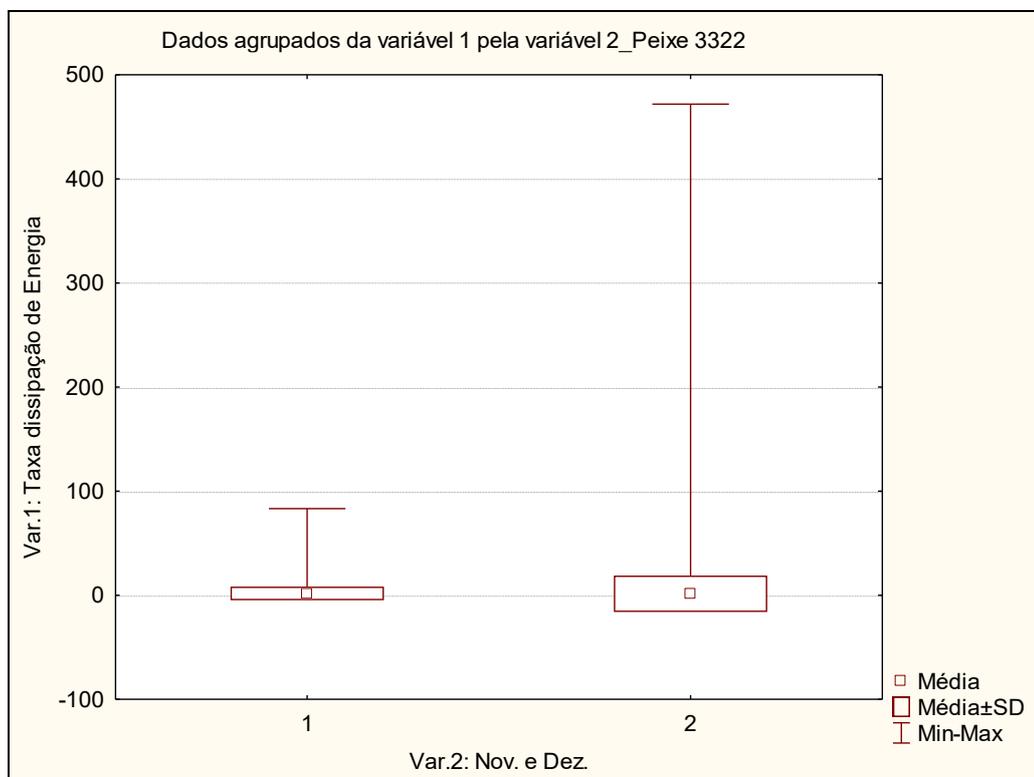


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.1.5 Variável Hidráulica “Taxa de dissipação de Energia”.

Para a variável hidráulica correspondente a Taxa de dissipação de energia, não se obteve diferenças significativas no mês de novembro e dezembro, quer dizer que o peixe preferiu as mesmas taxas de dissipação de energia nesses meses (FIGURA 83).

Figura 83 - Gráfico comparativo da variável Taxa de dissipação de Energia do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro.

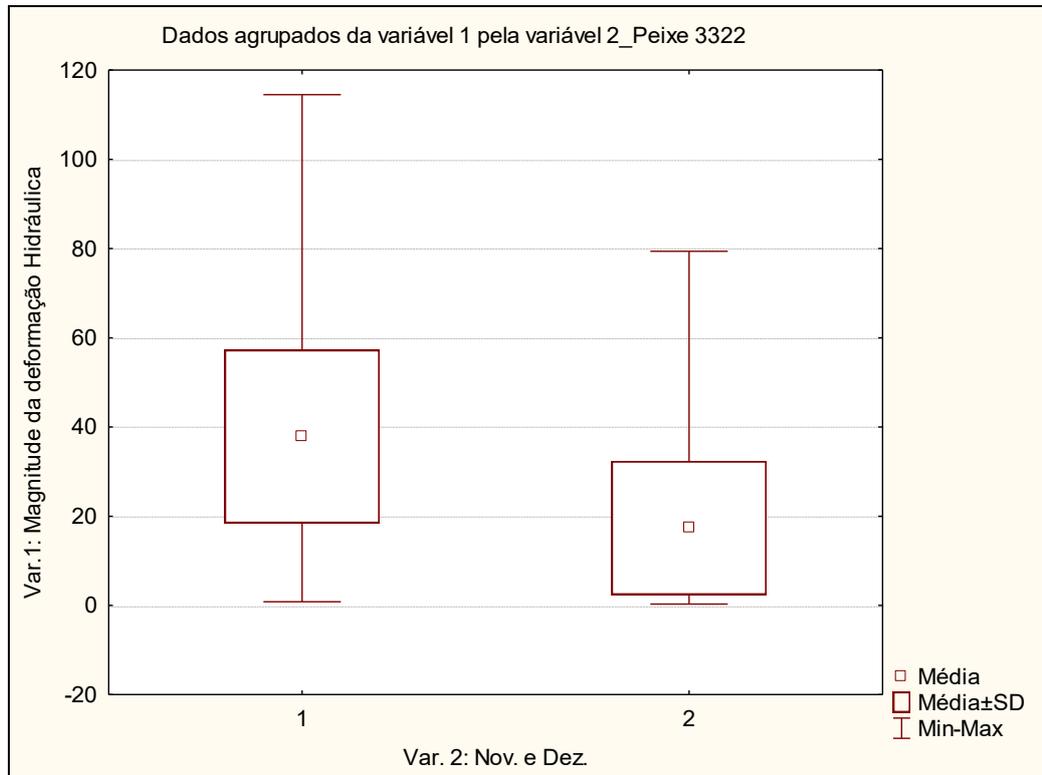


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.1.6 Variável Hidráulica “Magnitude da deformação”.

Para a variável hidráulica Magnitude da deformação, obteve-se diferenças significativas no mês de novembro e dezembro, quer dizer que o peixe preferiu taxas de magnitude de deformação hidráulica diferentes nesses meses (FIGURA 84).

Figura 84 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da deformação Hidráulica do peixe código 3322 no mês de novembro e dezembro.



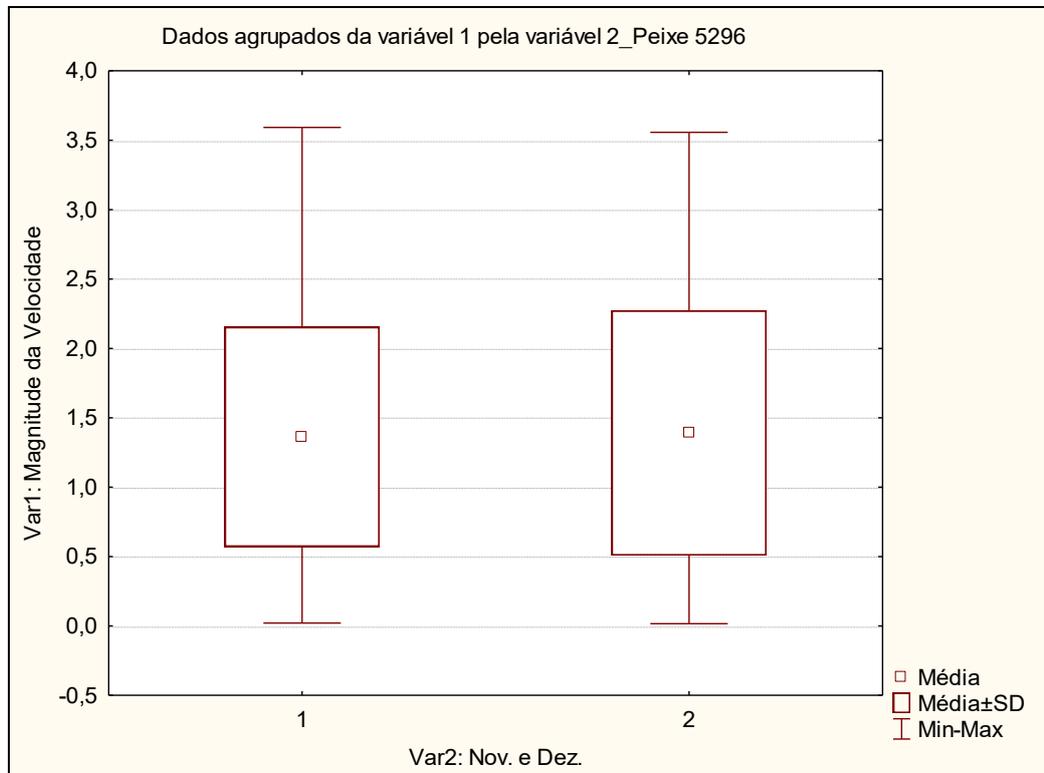
Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

### 5.2.2.2 Resultados gráficos da espécie de peixe *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296, correspondente ao mês de novembro e dezembro.

#### 5.2.2.2.1 Variável Hidráulica “Magnitude da Velocidade”

Para a espécie de Peixe (mandi), no mês de novembro e dezembro, avaliando a variável hidráulica de Magnitude da Velocidade, se observou que não houveram diferenças significativas e o peixe preferiu a mesma magnitude de velocidade para ambos meses, segundo o visualizado na Figura 85.

Figura 85 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Velocidade do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro.

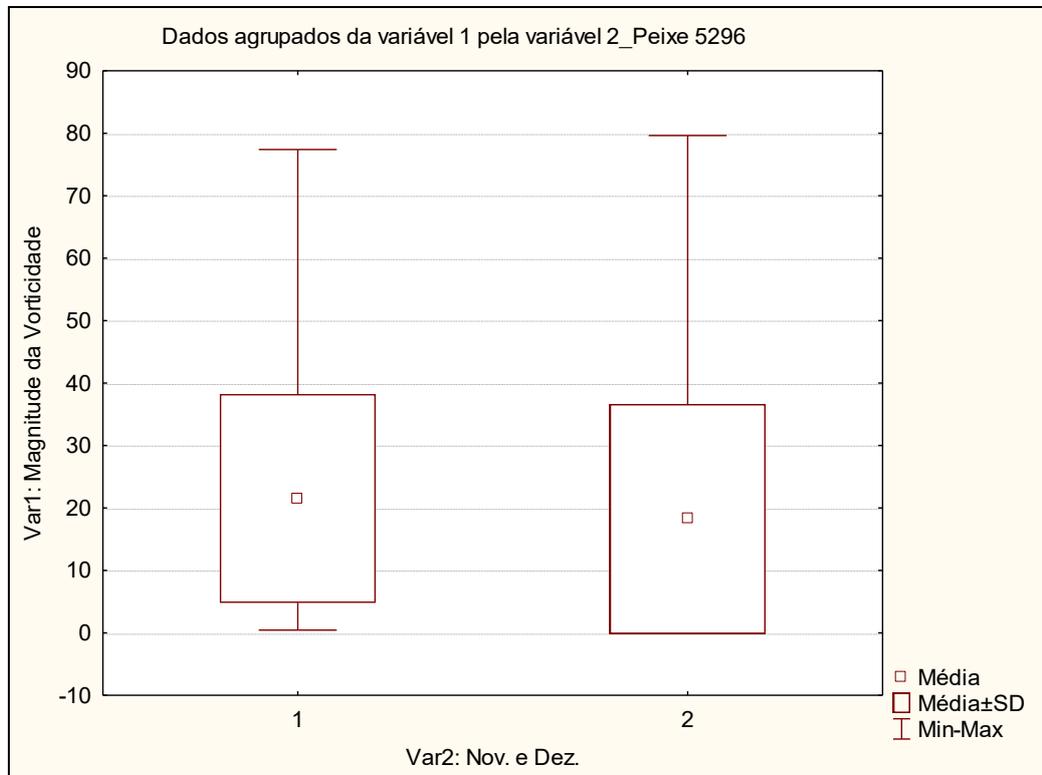


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.2.2 Variável Hidráulica “Magnitude da Vorticidade”

Para a variável hidráulica de Magnitude da Vorticidade, observou-se diferenças significativas e o peixe preferiu uma magnitude de vorticidade diferente para o mês de novembro e dezembro. (FIGURA 86)

Figura 86 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da Vorticidade do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro.

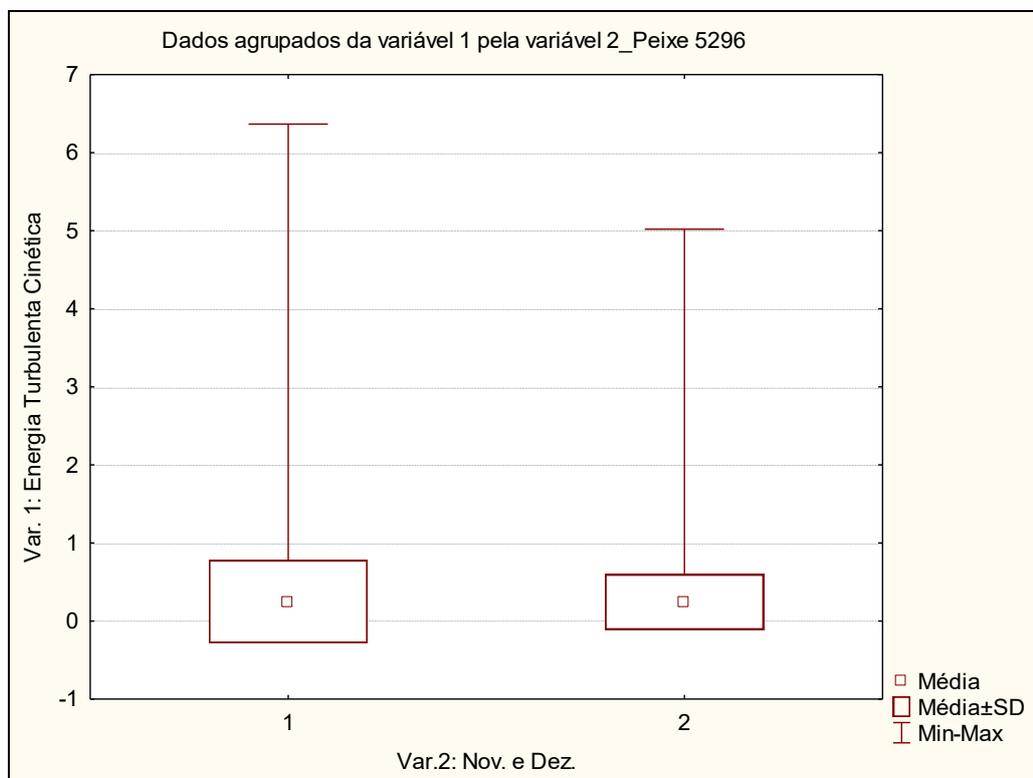


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

### 5.2.2.2.3 Variável Hidráulica “Energia Turbulenta Cinética”

Para a variável hidráulica correspondente a Energia Turbulenta Cinética, não se observou diferenças significativas no mês de novembro e dezembro, o peixe preferiu a mesma Energia Turbulenta Cinética em ambos meses (FIGURA 87).

Figura 87 - Gráfico comparativo da variável Energia Turbulenta Cinética do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro.

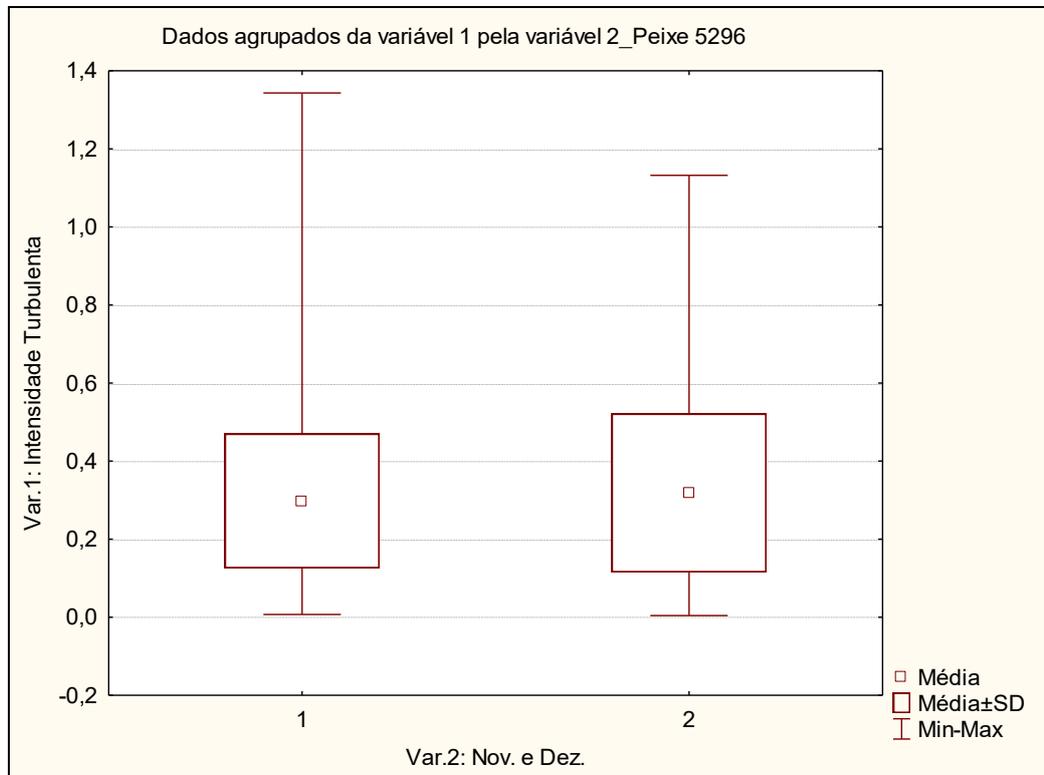


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.2.4 Variável Hidráulica “Intensidade Turbulenta”

Para a variável hidráulica correspondente a Intensidade Turbulenta, houveram diferenças significativas no mês de novembro e dezembro e o peixe preferiu uma Intensidade turbulenta diferente entre ambos meses (FIGURA 88).

Figura 88 - Gráfico comparativo da variável Intensidade Turbulenta do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro.

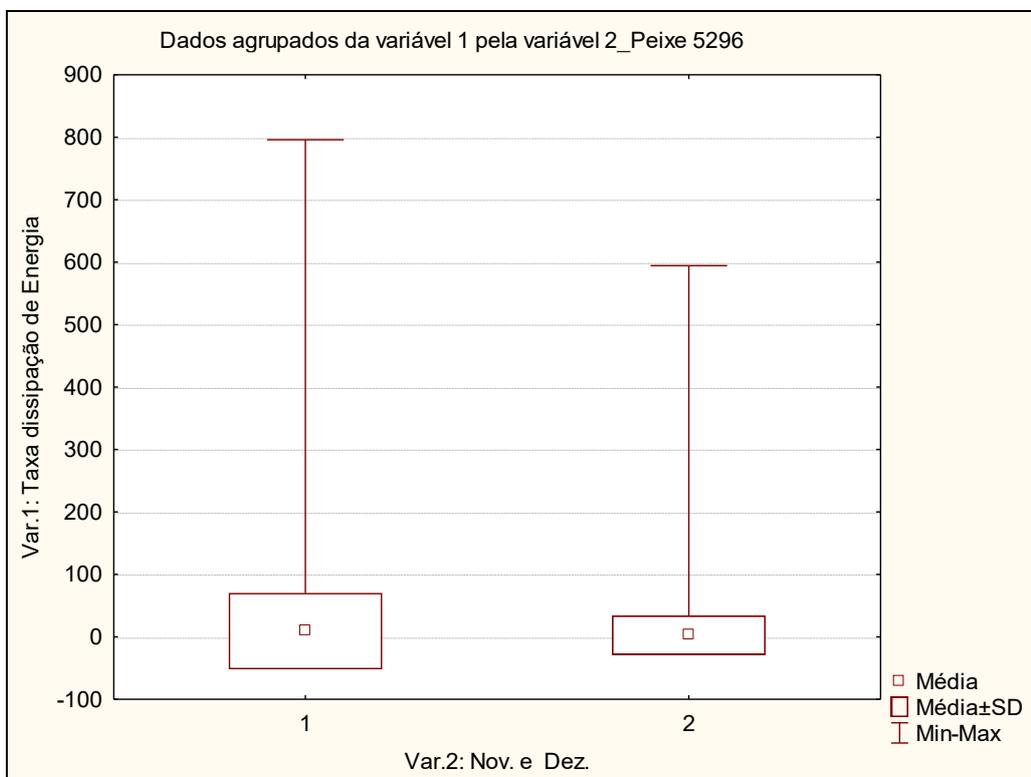


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.2.5 Variável Hidráulica “Taxa de dissipação de Energia”

Para a variável hidráulica correspondente a Taxa de dissipação de energia, houveram diferenças significativas no mês de novembro e dezembro, o peixe preferiu taxas de dissipação de energia diferente nesses meses (FIGURA 89).

Figura 89 - Gráfico comparativo da variável Taxa de dissipação de Energia do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro.

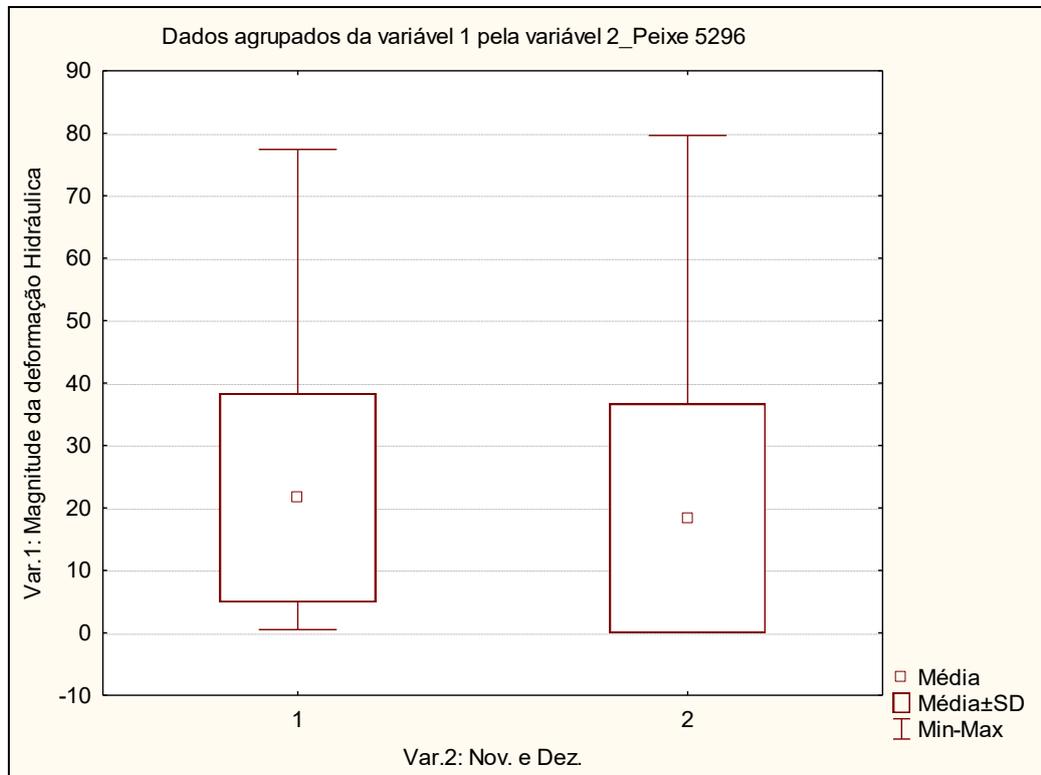


Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

#### 5.2.2.2.6 Variável Hidráulica “Magnitude da deformação”

Para a variável hidráulica Magnitude da deformação, se observou que houveram diferenças significativas no mês de novembro e dezembro e o peixe preferiu taxas de magnitude de deformação hidráulica diferentes durante esses meses (FIGURA 90).

Figura 90 - Gráfico comparativo da variável Magnitude da deformação Hidráulica do peixe código 5296 no mês de novembro e dezembro



Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

### 5.2.3 Teste de Duncan: Comparação das variáveis hidráulicas entre as diferentes espécies de peixes por mês.

#### 5.2.3.1 Resultados gráficos comparativos entre as espécies de Peixe *Prochilodus argenteus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296, correspondente ao mês de novembro.

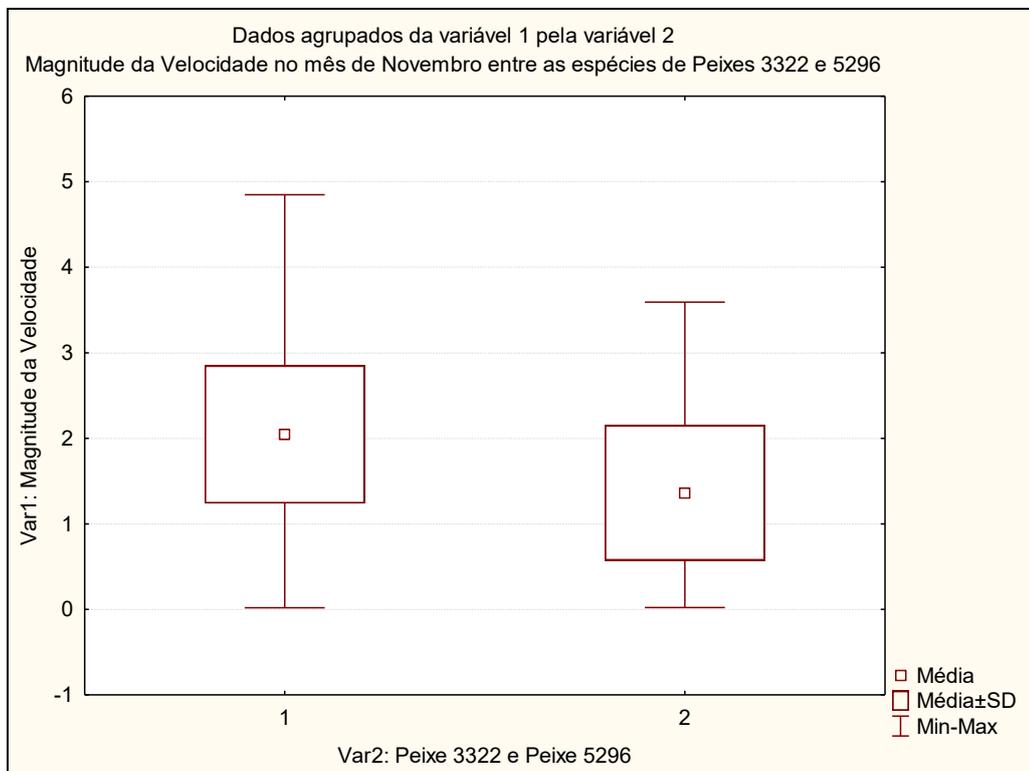
Os resultados estatísticos foram analisados por meio da Análise de Variância (*One-Way-ANOVA*) no software “*Statistica*” aplicando o Teste de *Duncan*.

Os próximos itens irão apresentar os resultados dos gráficos comparativo entre as duas espécies de peixes avaliadas (3322 e 5296) para o mês de novembro, segundo cada variável hidráulica de forma independente.

**5.2.3.1.1 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Velocidade” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para as espécies de Peixes (curimatã e mandi) no mês de novembro, avaliando a variável hidráulica de Magnitude da Velocidade no mesmo mês, se observou diferenças significativas e ambos peixes preferiram uma magnitude de velocidade diferente durante o mês de novembro, segundo o visualizado na Figura 91.

Figura 91 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Velocidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro.



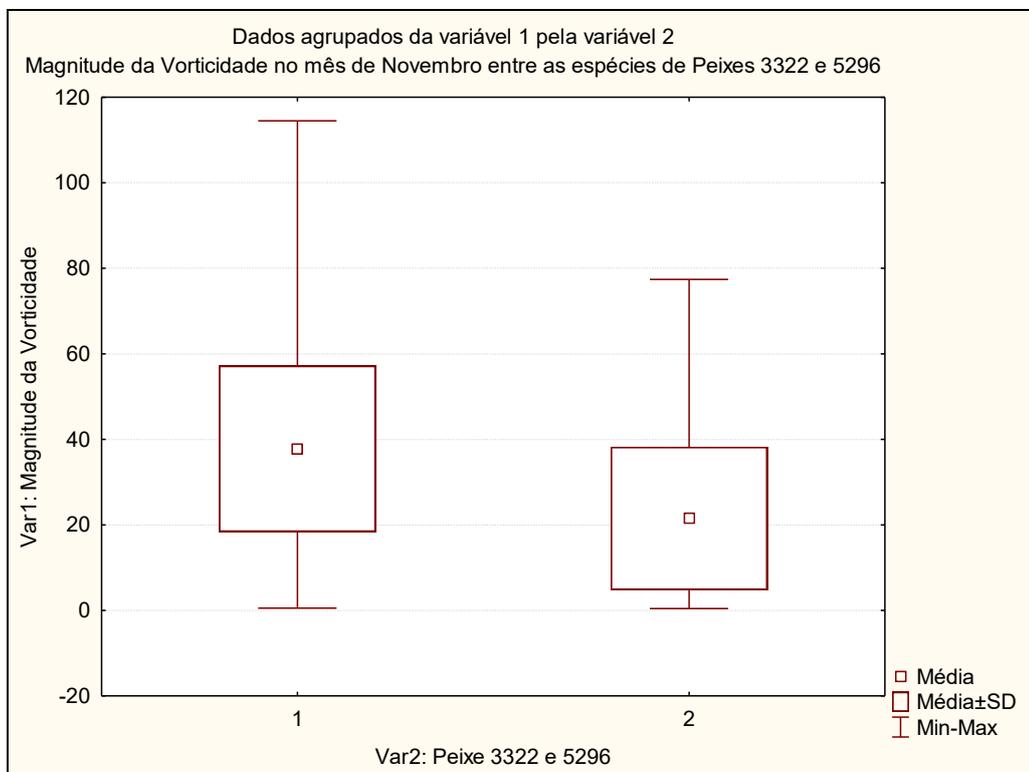
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de novembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.1.2 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Vorticidade” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica de Magnitude da Vorticidade, também obteve-se diferenças significativas entre o peixe 3322 (curimatã) e o peixe 5296 (mandi). Eles preferiram uma magnitude de vorticidade diferente entre o mês de novembro (FIGURA 92).

Figura 92 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Vorticidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro.



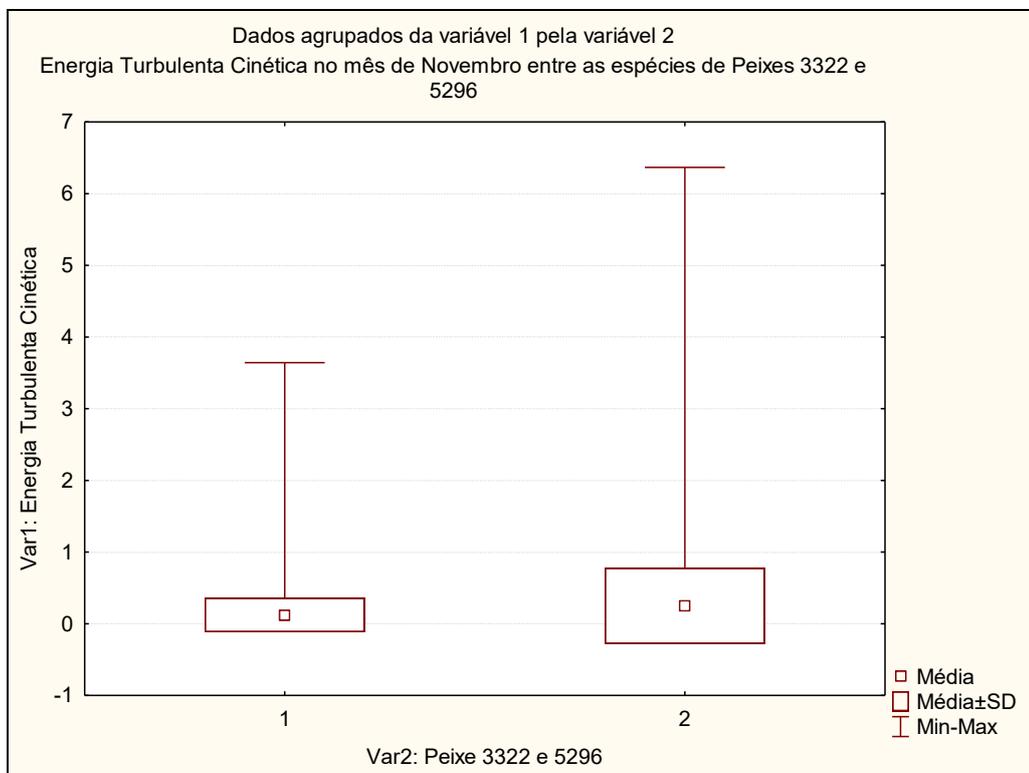
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de novembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.1.3 Comparação da variável hidráulica “Energia Turbulenta Cinética” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica de Energia Turbulenta Cinética, obteve-se diferenças significativas entre ambos peixes, onde preferiram uma energia turbulenta cinética diferente entre o mês de novembro (FIGURA 93).

Figura 93 - Gráfico comparativo da variável “Energia Turbulenta Cinética” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro.



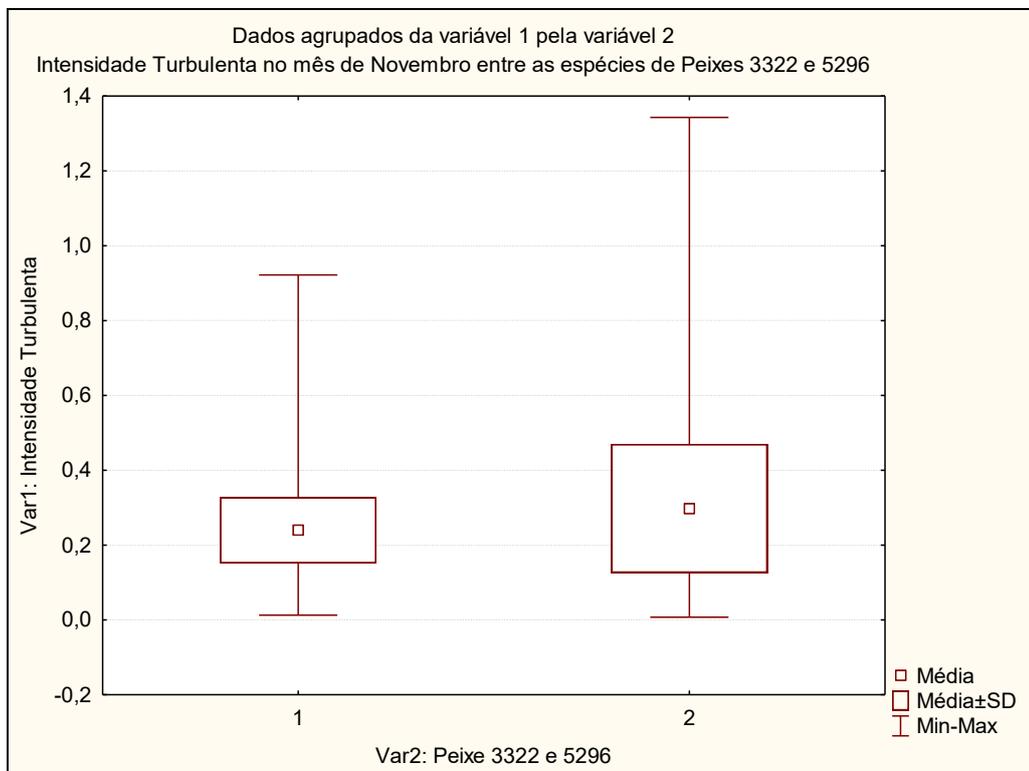
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de novembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.1.4 Comparação da variável hidráulica “Intensidade Turbulenta” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica Intensidade Turbulenta, obteve-se diferenças significativas entre ambos peixes, eles preferiram uma Intensidade turbulenta diferente entre o mês de novembro (FIGURA 94).

Figura 94 - Gráfico comparativo da variável “Intensidade Turbulenta” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro.



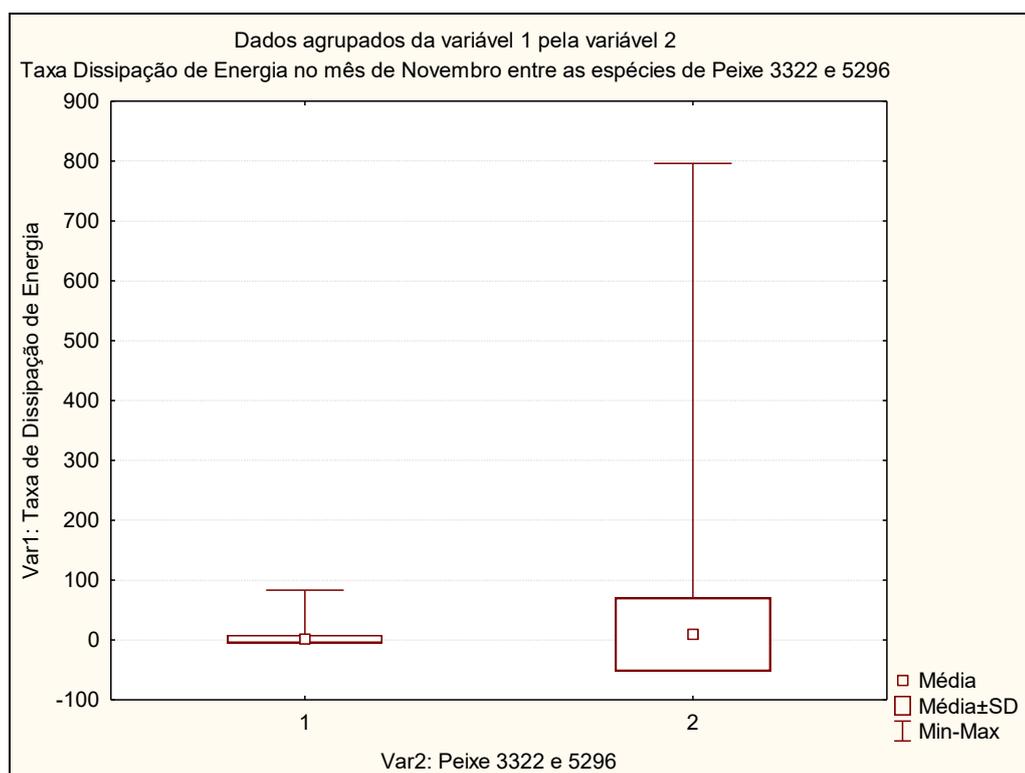
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de novembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.1.5 Comparação da variável hidráulica “Taxa dissipação de Energia” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica da Taxa de dissipação de Energia, obteve-se diferenças significativas entre os dois peixes, quer dizer, que eles preferiram taxas de dissipação de energia diferentes entre o mês de novembro (FIGURA 95).

Figura 95 - Gráfico comparativo da variável “Taxa dissipação de energia” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro.



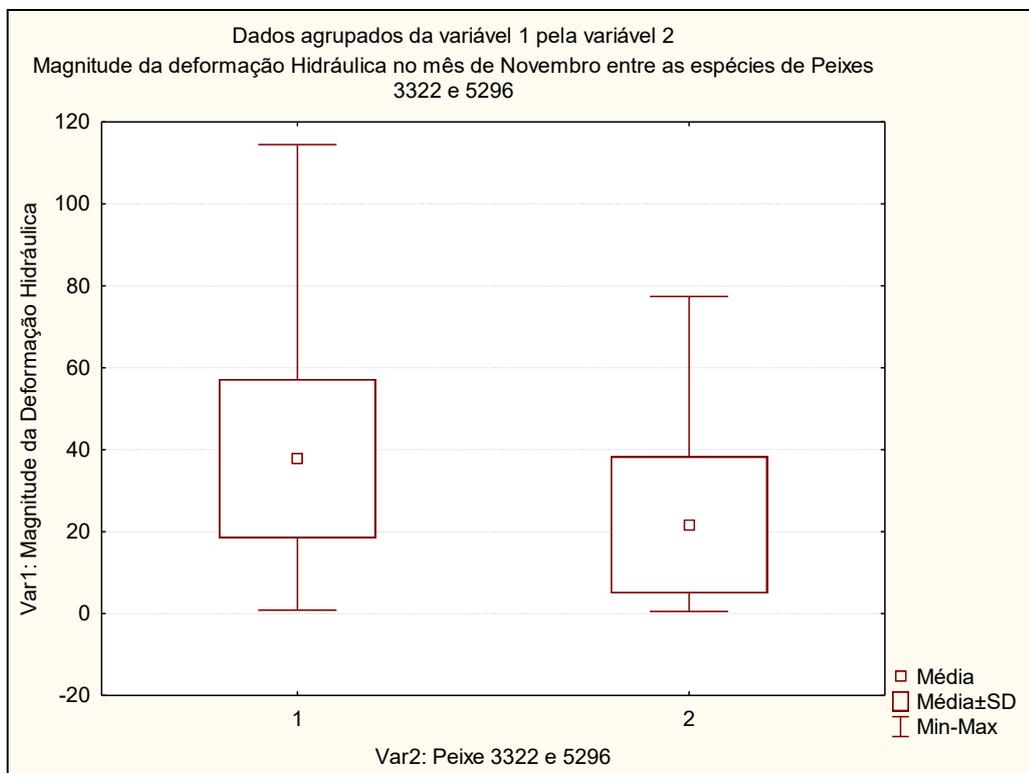
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de novembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.1.6 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da deformação” no mês de novembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica da Magnitude da deformação, obteve-se diferenças significativas entre ambos peixes e eles preferiram uma magnitude de deformação hidráulica diferente durante o mês de novembro (FIGURA 96).

Figura 96 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da deformação hidráulica” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de novembro.



Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de novembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.2 Resultados gráficos comparativos entre as espécies de Peixe *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296, correspondente ao mês de dezembro.**

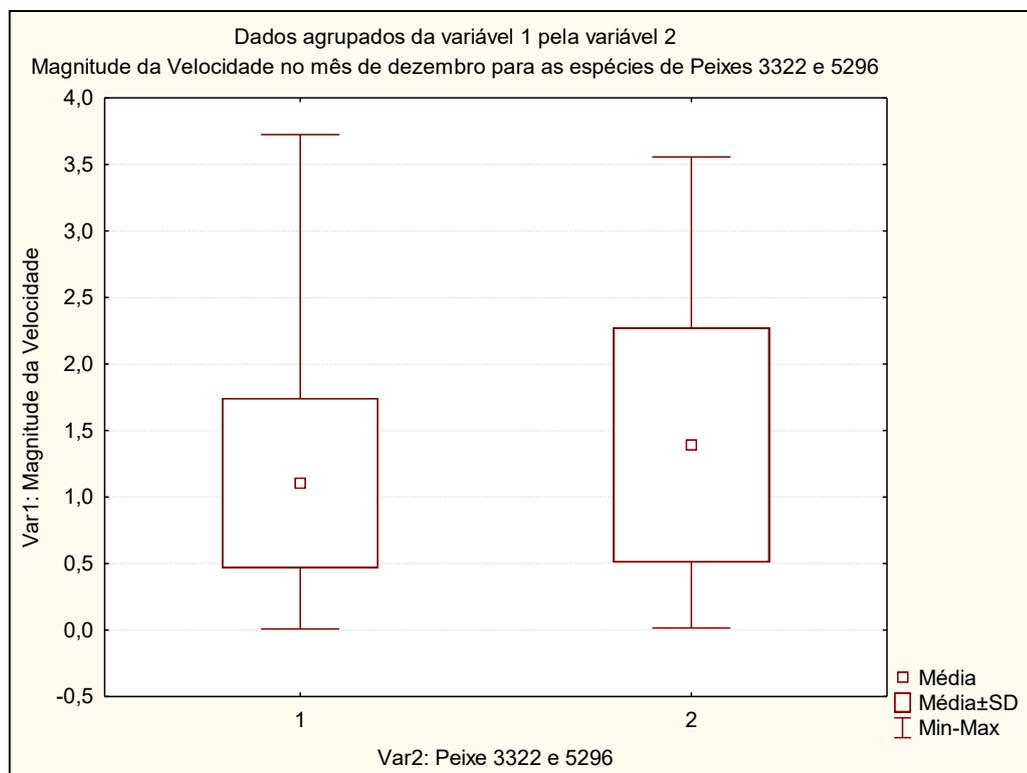
Os resultados estatísticos foram analisados por meio da Análise de Variância (*One-Way-ANOVA*) no software “*Statistica*” aplicando o Teste de Duncan.

Nos próximos itens serão apresentados os resultados dos gráficos comparativos entre as duas espécies de peixes avaliadas (3322 e 5296) para o mês de dezembro, segundo cada variável hidráulica de forma independente.

**5.2.3.2.1 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Velocidade” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para as espécies de Peixes (curimatã e mandi) no mês de dezembro, avaliando a variável hidráulica de Magnitude da Velocidade no mesmo mês, se observaram diferenças significativas e ambos peixes preferiram uma magnitude de velocidade diferente em dezembro, segundo o visualizado na Figura 97.

Figura 97 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Velocidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.



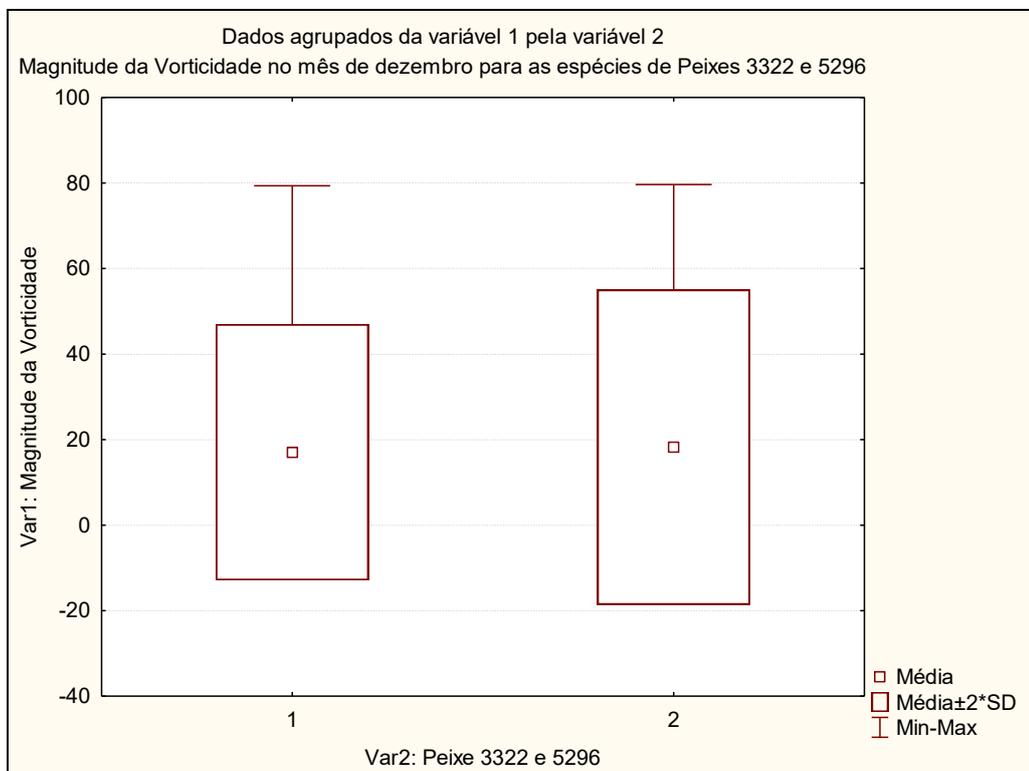
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.2.2 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da Vorticidade” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica de Magnitude da Vorticidade, ela não teve diferenças significativas entre o peixe 3322 (curimatã) e o peixe 5296 (mandi), eles preferiram a mesma magnitude de vorticidade durante o mês de dezembro (FIGURA 98).

Figura 98 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da Vorticidade” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro



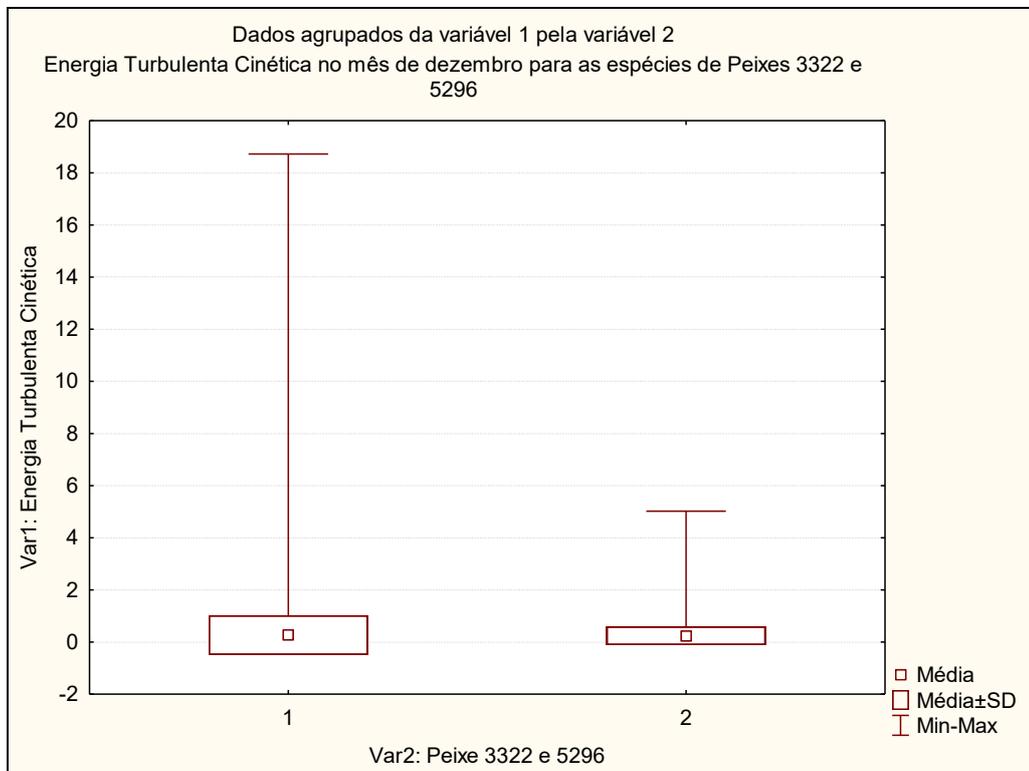
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.2.3 Comparação da variável hidráulica “Energia Turbulenta Cinética” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica da Energia Turbulenta Cinética, não obteve-se diferenças significativas entre ambos peixes, eles preferiram a mesma energia turbulenta cinética no mês de dezembro (FIGURA 99).

Figura 99 - Gráfico comparativo da variável “Energia Turbulenta Cinética” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.



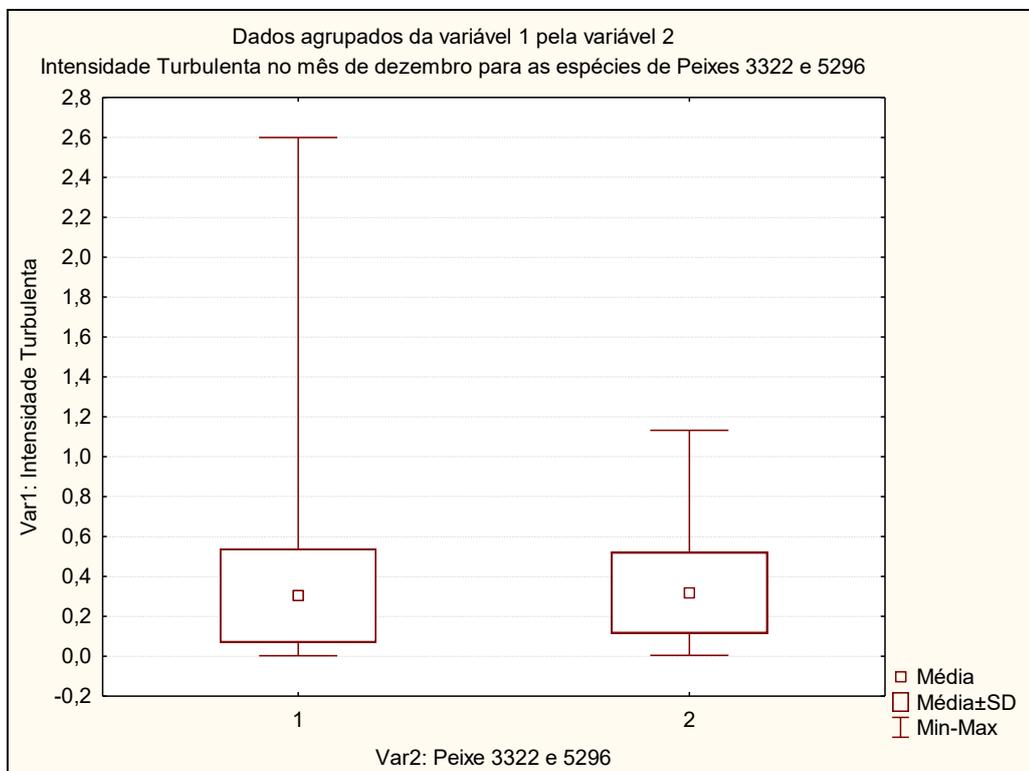
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016.

**5.2.3.2.4 Comparação da variável hidráulica “Intensidade Turbulenta” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica Intensidade Turbulenta, também não obteve-se diferenças significativas entre os dois peixes, eles preferiram a mesma Intensidade turbulenta durante o mês de dezembro (FIGURA 100).

Figura 100 - Gráfico comparativo da variável “Intensidade Turbulenta” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.



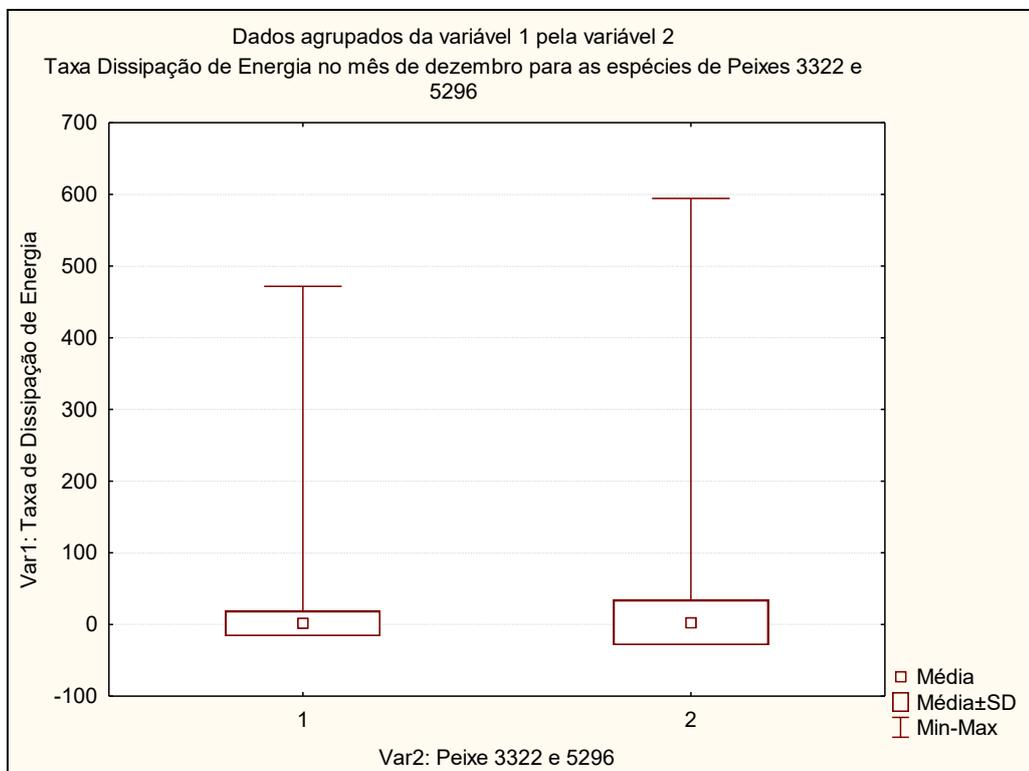
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

**5.2.3.2.5 Comparação da variável hidráulica “Taxa dissipação de Energia” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica da Taxa de dissipação de Energia, não obteve-se diferenças significativas entre ambos peixes, eles preferiram a mesma taxa de dissipação de energia no mês de dezembro (FIGURA 101).

Figura 101 - Gráfico comparativo da variável “Taxa dissipação de energia” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.



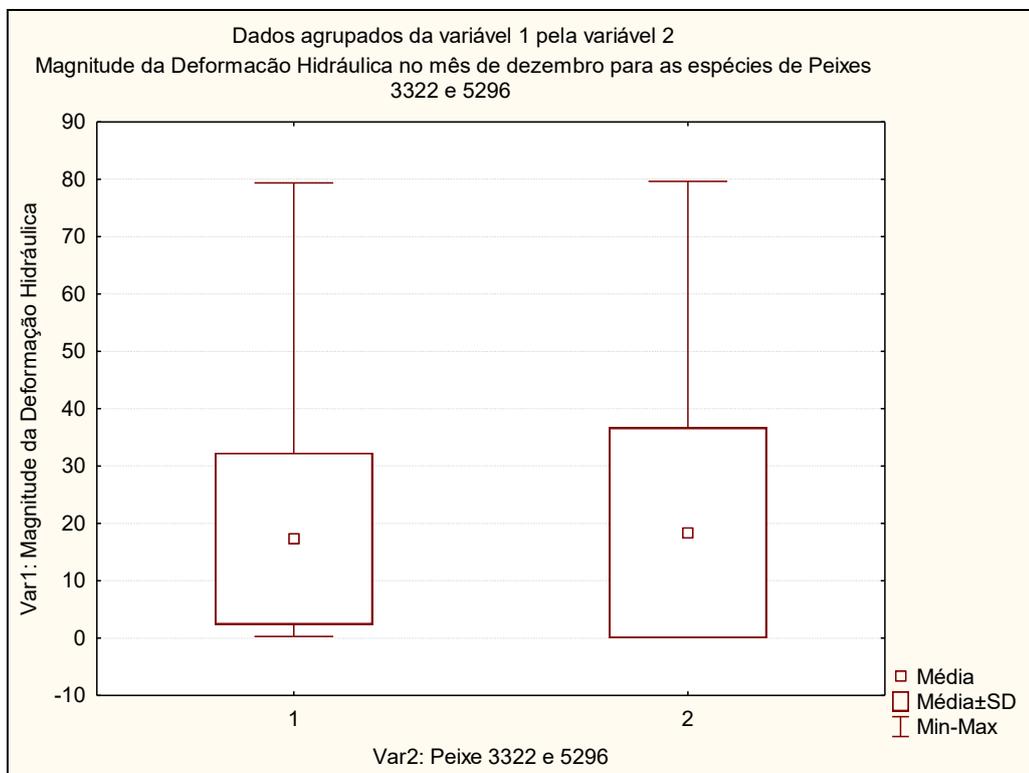
Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

**5.2.3.2.6 Comparação da variável hidráulica “Magnitude da deformação” no mês de dezembro entre as duas espécies de peixes *Prochilodus argentus* (curimatã) código 3322 e *Pimelodus maculatus* (mandi amarelo) código 5296.**

Para a variável hidráulica da Magnitude da deformação, também não obteve-se diferenças significativas entre os dois peixes, eles preferiram a mesma magnitude de deformação hidráulica durante o mês de dezembro. (FIGURA 102).

Figura 102 - Gráfico comparativo da variável “Magnitude da deformação hidráulica” dos peixes código 3322 e 5296 no mês de dezembro.



Legenda: A segunda variável na parte inferior da figura, o número 1 corresponde ao peixe 3322 e o número 2 corresponde ao peixe 5296, no mês de dezembro.

Fonte: AUTORIA PROPRIA, 2016

## 6 DISCUSSÃO

Este trabalho apresentou um modelo de comportamento de peixes no trecho a jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias, principalmente na área do canal de fuga. Para isto, o estudo foi dividido em duas partes: o primeiro passo foi estruturar uma simulação numérica computacional em três dimensões e posteriormente desenvolver a avaliação dos dados biológicos coletados através de telemetria acústica.

Esta etapa da dissertação objetiva apresentar um comparativo entre os resultados obtidos nesta investigação e os dados encontrados na literatura. Sendo separados em duas etapas: comparativo dos resultados da simulação numérica e o comparativo dos dados biológicos. A combinação destas variáveis, simulação numérica e biológica, são estudos ainda escassos na literatura nacional. Estes parâmetros foram interligados aos dados hidráulicos da simulação numérica de forma a entender o comportamento dos peixes na área do canal de fuga.

Quanto à simulação numérica, durante a elaboração da malha computacional foram percebidas diversas regiões que necessitavam de refinamento dos elementos para que a simulação pudesse ser aceita no software *ANSYS FLUENT*. Soares (2007) afirma que o tamanho dos elementos define as condições e características na geração de uma malha computacional. Se os elementos forem pequenos, existe maior precisão na malha, mas exige uma quantidade de tempo maior de processamento. Boz *et al.* (2013) alega que o tempo, o tamanho, a resolução de malha e o esquema numérico são parâmetros de modelação que influenciam o tempo gasto da simulação numérica e na qualidade de uma solução de CFD adequada.

Já Sorensen e Nielsen (2003) admitem que mesmo em uma malha computacional com formatação grosseira podem alcançar resultados precisos. Afirmam que elevando o número de elementos de uma malha, o refinamento deve ser realizado até que sejam obtidos resultados, independente das características da malha. Druzeta *et al.* (2009) menciona estudos de modelo bidimensional de águas rasas, onde o refinamento da malha computacional afetou negativamente a precisão dos resultados.

Diante destes diversos argumentos, fica a dúvida se o melhoramento da malha e um maior refinamento, foram os fatores que elevaram o tempo de processamento para 108 dias de

simulação (20/05/16 a 20/09/16), onde foram realizadas 22.800 iterações, porém a convergência mássica total não foi alcançada neste trabalho.

Duarte (2014) simulou um trecho do rio e o Canal de Fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias, o tempo gasto da simulação numérica computacional foi de: 4 hrs para a primeira malha, 11 hrs para a segunda malha e 29 hrs para a terceira malha, calculando 1000 iterações para cada uma delas, onde ele menciona que no aumento do número dos elementos das suas malhas aumentou também o tempo computacional e que para existir uma convergência mássica, onde a vazão de entrada no domínio é a mesma vazão de saída, exige um tempo de gasto computacional considerável.

Nesta investigação, serão analisadas através das variáveis hidráulicas relativas ao período de novembro e dezembro de 2011. Observando os dados biológicos de Suzuki (2014) que verificou diferenças das variáveis de movimento dos peixes no canal de fuga através de três comparativos: tempo de permanência, o número de visitas e a permanência no canal de fuga da Usina de Três Marias entre as espécies de peixes *P. maculatus* e *P. argenteus*.

Suzuki (2014) observou que a maioria dos peixes, mais de 75% deixou o canal de fuga em menos de uma semana e que a permanência do tempo foi maior para a espécie *P. maculatus* em comparação à espécie *P. argenteus*. Porém, apesar do número de visitas ter sido mais elevado para *P. maculatus*, não houve diferença significativa entre as duas espécies. Em quanto a permanência no canal de fuga, também foi significativamente mais longa para o *P. maculatus* (28,8 hrs) do que para *P. argenteus* (5,9 hrs).

Já o presente estudo, avaliando as variáveis hidráulicas, realizou dois comparativos. O primeiro comparativo apresentou que *P. maculatus* visitou áreas com as mesmas taxas de velocidade e energia turbulenta cinética, sendo seu comportamento mais constante que o *P. argenteus*, que visitou áreas com variáveis hidráulicas diferentes entre os meses de novembro e dezembro de 2011. Além disso o *P. maculatus* nada mais fundo que o *P. argenteus*. Isto poderia explicar o fato verificado por Suzuki (2014) de que o *P. maculatus*, possivelmente por este motivo permaneceu por mais tempo na área do canal de fuga.

No segundo comparativo, no mês de novembro de 2011, ambas espécies tiveram diferenças significativas, preferindo diferente velocidade, vorticidade, energia turbulenta cinética, intensidade turbulenta, taxas de dissipação de energia e magnitudes da deformação hidráulica. Já no mês de dezembro, os peixes preferiram velocidades diferente, entretanto as demais variáveis hidráulicas não apresentaram diferenças significativas entre as espécies.. Esta semelhança de preferência dos peixes, quanto as demais variáveis hidráulicas no mês de dezembro, pode ser explicada pelo período ser de grande possibilidade de chuvas intensas, fator que eleva o volume de água no rio. Thorstad *et al.*, (2003) explicam que durante regimes de alto fluxo de água nas barragens, os movimentos dos peixes são influenciados pelas operações onde existem usinas hidrelétricas, aumentando a probabilidade de espécies migradoras serem atraídas para o canal de fuga. Agostinho *et al.* (2008) alega que ao ter um aumento do fluxo da água, a qualidade dela também muda o que provoca à perda de habitat para muitas espécies, ainda mais para as espécies de peixes migradores, isto significa uma interrupção dos seus movimentos, comprometendo diretamente seu ciclo reprodutivo.

A importância do desenvolvimento deste trabalho a nível nacional e internacional está na possibilidade de fornecimento de informações para compreender o comportamento das espécies migradoras de peixes, as respostas as condições hidráulicas e as preferências por determinadas variáveis. O trabalho proporciona ferramentas e informações, onde existem Usinas Hidrelétricas. Ao mesmo tempo, ele permitiu o uso de ferramentas importantes como um modelo de dinâmica computacional de fluidos (CFD) para descrever os padrões hidrodinâmicas em escalas significativas com relação aos movimentos dos peixes.

Um método de comportamento das espécies de peixes migradores no rio São Francisco traz inúmeros benefícios de forma a evitar a mortalidade das espécies de peixes no rio e permite que os empreendimentos hidrelétricos, continuem gerando energia para o país, de forma mais segura e conciliadora com o meio ambiente, observando as preferências hidráulicas das espécies, tomadas de decisão para o operador da UHE e criação de estratégias de operação, principalmente durante a manutenção da Usina Hidrelétrica.

Deve-se considerar ainda que as hidrelétricas são importantes fontes de energia para o Brasil e serão sempre apontadas em qualquer cenário, ainda que condicionadas pelo transporte hidroviário, exigências ambientais e fontes alternativas de geração de energia (BRASIL, 2006).

Porém trabalhar neste tipo de cenário envolve um grande desafio, já que são locais onde existe uma ampla diversidade biológica presente nos rios, os quais são interceptados pelas barragens hidrelétricas. Conciliar ambos fatores pode ser de difícil consenso, porém de uma importância relevante e possível de ser estudada.

## 7 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi a combinação de informações de um modelo hidrodinâmico tridimensional com informações biológicas, coletadas através de telemetria acústica, gerando um modelo de comportamento das espécies de peixes na área do Canal de Fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias em relação as variáveis hidráulicas. Este modelo serve como referência para desenvolvimento de próximos estudos mais aprofundados e com maior número de avaliações detalhadas.

A malha da simulação numérica do tipo não ortogonal estruturada foi escolhida por se tratar de uma malha que costuma ser mais estável que uma malha não estruturada. Durante a geração da malha, foram necessários processos adaptativos para vencer as dificuldades. O tempo computacional e a limitação dos dados biológicos obtidos apenas na região do canal de fuga, restringiram a área de estudo apenas na região a jusante das saídas das turbinas.

Para que a malha do canal de fuga pudesse ser considerada como ótima, simular no *software ANSYS FLUENT* e realizar os cálculos matemáticos das equações diferenciais de *Navier-Stokes* de forma exata, foram necessários vários tipos de refinamentos: o Fator *Y plus*, razão de aspecto, qualidade da ortogonalidade e o índice de *Skewness*, que avalia a qualidade da malha e mostra as partes que não estão uniformes no seu tamanho e forma.

O *software ANSYS FLUENT* ofereceu condições para a simulação numérica computacional de escoamentos multifásicos, pois possui a capacidade de resolução de problemas tridimensionais complexos, através da utilização do código tridimensional Método de Volumes Finitos que também é muito aplicado para modelar o fluxo de escoamentos multifásico, onde neste caso, considerou dois fluidos, ar e água.

Fatores que provavelmente impossibilitaram a totalização da convergência mássica, onde a vazão de entrada deveria ser igual a vazão de saída: o refinamento maior e redução no tamanho de elementos da malha, possivelmente foram os motivos que aumentaram o tempo gasto da simulação, problemas relacionados ao computador como reiniciar de forma inesperada e desligar em consequência de falta de energia elétrica, corte de internet, número de licencias

disponíveis, sendo que unicamente conseguiu-se simular com 4 processadores, limitando ocupar uma maior quantidade e assim ganhando velocidade de simulação.

As análises dos dados biológicos combinados às variáveis hidráulicas para um indivíduo de cada espécie de peixes, *P. argentus* e *P. maculatus*, permitiu observar seus respectivos comportamentos na área do canal de fuga da UHE de Três Marias, lugar onde existe um risco maior e mais vulnerável que possibilita a mortalidade de peixes no rio. Observou-se que ambos peixes, tiveram diferentes preferências com respeito as variáveis hidráulicas, durante os meses de novembro e dezembro. Compreender os padrões de movimentos das espécies, fornece recursos para reduzir os impactos à ictiofauna.

Este trabalho oferece um método para o estudo do comportamento de peixes, podendo ser utilizado para outras Usinas Hidrelétricas e também outras espécies de peixes, diferentes das duas analisadas.

## **8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos resultados e conclusões da presente dissertação, sugere-se os seguintes itens para pesquisas futuras:

- 1) Continuar com a simulação numérica da malha de estudo até atingir a convergência mássica do problema.
- 2) Simular outros cenários com valores de vazão diferentes aos estipulados neste trabalho.
- 3) Simular o trecho do rio de 3 km à jusante da Usina Hidrelétrica de Três Marias, para avaliação das variáveis hidráulicas em um trecho maior que o simulado nesta investigação.
- 4) Trabalhar com uma quantidade maior de indivíduos monitorados com a telemetria acústica.
- 5) Considerar estudos com outras espécies de peixes, diferentes as analisadas nesta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, Noah S.; BEEMAN, John W.; EILER, John Heinrich. *Telemetry techniques: a user guide for fisheries research*. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society, 2012.

AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; PELICICE, F. M. *Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil*. 1. ed. Maringá: Universidade Estadual de Maringá 2007. 501 p.

AGOSTINHO, Angelo Antonio; PELICICE, Fernando Mayer; GOMES, Luiz Carlos. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian Journal of Biology*, 2008 v. 68, n. 4, p. 1119-1132.

ANA. Agência Nacional de Águas. Região Hidrográfica do São Francisco. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx>>. Acesso em: 03/03/2015.

ANDRADE, Francisco. *et al.* 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*. 3. ed. 2008. Brasília, 2008. 236 p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de informações de Geração. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 22/02/2016.

ANSYS FLUENT. 2010. *Transonic Flow Over a Naca0012 Airfoil*. Introduction to Ansys Fluent. ANSYS, Inc. Proprietary. 2010. 67 p.

ARGOS. Mediciones de corrientes. Disponível em: <<http://www.argosep.com/medcor.html>>. Acesso em: 02/07/2015.

ASSUNÇÃO, Renato M. *Estatística Espacial Aplicada*. LESTE - Laboratório de Estatística Espacial Departamento de Estatística - UFMG. Belo Horizonte. 2007. 61p. Disponível em: <<http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/pessoais:renato:espacial:semanal.pd>>. Acesso em: 03/09/2015.

BARBOSA JÚNIOR, Antenor Rodrigues. *Elementos de Hidrologia Aplicada*. Escoamento Superficial. Disponível em: <[http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodrigues/6\\_escoamento%20superficial.pdf](http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodrigues/6_escoamento%20superficial.pdf)>. Acesso em: 15/07/2015.

BARLETTA, Mario et al. Fish and aquatic habitat conservation in South América: a continental overview with emphasis on neotropical systems. *Journal of Fish Biology*, 2010. v. 76, n. 9, p. 2118-2176.

BATELLA, Wagner Barbosa; DINIZ, Alexandre Magno Alves. O uso de técnicas elementares de estatística espacial no estudo da reestruturação espacial da criminalidade violenta no Estado de Minas Gerais: 1996-2003. *Caderno de Geografia*, 2006. Vol. 16. N. 26. 1º Sem.

BEGOSSI, Alpina. Ecologia humana: um enfoque das relações homem-ambiente. *Interciência*, 1993. v. 18, n. 3, p. 121-132.

BENTES, L. Telemetria: Telemetria acústica. In: INTERREG III A COOPERAÇÃO TRANFRONTERIZA ESPANHA PORTUGAL.2008. 1-28. Disponível em: <<http://cfrg.ccmr.ualg.pt/documents/Acoustic%20telemetry.pdf>>. Acesso em: 9 out.2015.

BRANDÃO, Diego Nunes. *Um Refinamento h-Adaptativo de Malhas para o Método dos Elementos Finitos utilizando uma Estrutura de Grafo*. 2008. 64 f. (Mestrado Computação), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

BRANDT, S. B. Acoustic assessment of fish abundance and distribution. In: MURPHY, B.R. *Fisheries techniques*, 2.ed. Maryland: Bethesda. American Fisheries Society, 1996, p. 385-432.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia e colaboração Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Nacional de Energia 2030, 2006-2007*. Brasília, 2007a. 210 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia e colaboração Empresa de Pesquisa Energética. *Balço Energético Nacional 2014: Ano base 2013, 2014*. Brasília 2014. 288 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia e Secretaria de Recursos Hídricos. *Plano Nacional de Recursos Hídricos*, 2006. Brasília, 2006. 143 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Série: Capacitação e atualização em geoprocessamento em saúde. *Introdução à estatística espacial para a saúde pública*. 3 ed. Brasília, 2007b. 124 p.

BRASIL. *Lei 15.082*, de 27 de abril de 2004. Dispõe sobre rios de preservação permanente e dá outras providências. Minas Gerais, 2004.

BOZ, Ziyet; ERDOGDU, Ferruh; TUTAR, Mustafa. Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating. *Journal of Food Engineering*, 2013. v. 123, p. 8-16.

BUNN, Stuart E.; ARTHINGTON, Angela H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental management*, v. 30, n. 4, p. 492-507, 2002.

CAE. Computacional Fluid Dynamics: Ansys CFX and Fluent CFD Software. 2015. Disponível em: <<https://caei.com/ansys-software-support/ansys-software/computational-fluid-dynamics-ansys-cfx-and-fluent-cfd-software>>. Acesso em: 12/08/2015.

CALLISTO, Marcos. *et al.* Componentes bióticos para avaliações de vazões ecológicas a jusante de barramento hidrelétrico. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2011.

CALLISTO, Marcos, et al. *Condições Ecológicas em Bacias Hidrográficas de Empreendimentos Hidrelétricos*. Minas Gerais: Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, 2014. 264p.

CCEE. CAMARA DE COMERCIALIZACAO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Fontes de Energia*. Brasil 2015. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/fontes?\\_adf.ctrl-state=13co9cfgwc\\_4&\\_afLoop=91403428629677#%40%3F\\_afLoop%3D91403428629677%26\\_adf.ctrl-state%3D1ctxuroc88\\_4](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=13co9cfgwc_4&_afLoop=91403428629677#%40%3F_afLoop%3D91403428629677%26_adf.ctrl-state%3D1ctxuroc88_4)>. Acesso em: 29 abr. 2015.

CFD. CFD Online 2010. Disponível em: <[http://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless\\_wall\\_distance\\_\(y\\_plus\)](http://www.cfd-online.com/Wiki/Dimensionless_wall_distance_(y_plus))>. Acesso em: 13 set. 2016.

CÂMARA, G; MONTEIRO, A.M.; FUCKS,S.D.; CARVALHO, M S. *Análise espacial e geoprocessamento*. Análise espacial de dados geográficos, v. 2, 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap1-intro.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2105.

CARVALHO, Thiago Morato. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife -PE, v. 1, n. 1, p. 73-85, 2008.

Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/19>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. *Usinas Hidrelétricas da Cemig*, 14 abr. 2015. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/a-cemig/Nossa\\_Historia/Paginas/Usinas\\_Hidreletricas.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a-cemig/Nossa_Historia/Paginas/Usinas_Hidreletricas.aspx)>. Acesso em: 14 abr.2015

CEMIG. Plants on the São Francisco River Basin. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/en-us/Company\\_and\\_Future/Sustainability/Programs/environmental\\_programs/peixe\\_vivo/Pages/usinas\\_sao\\_francisco.aspx](http://www.cemig.com.br/en-us/Company_and_Future/Sustainability/Programs/environmental_programs/peixe_vivo/Pages/usinas_sao_francisco.aspx)>. Acesso em: 20 out. 2015.

CEMIG. Nosso grupo. Disponível em: [http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/nosso\\_grupo/Paginas/Nosso\\_Grupo.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nosso_grupo/Paginas/Nosso_Grupo.aspx). >. Acesso em: 22 fev. 2016a.

CEMIG. Cemig e governo estadual inauguram usina solar no Mineirão. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/Usina-Solar-do-Mineirao.aspx>>. Acesso em: 22 fev. 2016b.

COLLIER, M.; WEBB, R. H.; SCHMIDT, J. C. DAMS AND RIVERS: A Primer on the Downstream Effects of Dams. U.S. GEOLOGICAL SURVEY: Circular 1126, 2000, ed. 2.

COOKE, STEVEN J.; THORSTAD, E. B. Is radio telemetry getting washed downstream? The changing role of radio telemetry in studies of freshwater fish relative to other tagging and telemetry technology. In: AMERICAN FISHERIES SOCIETY SYMPOSIUM. 2012. p. 349-369.

COMITE DE BACIA-MG. SF4- Entorno da Represa de Três Marias. 2012. Disponível em: <<http://comites.igam.mg.gov.br/comites-estaduais/bacia-do-rio-sao-francisco/sf4-cbh-do-entorno-da-represa-de-tres-marias>>. Acesso em: 21 out. 2015

COSTA, Roberto Rebelo. *Simulação Numérica de um Teste de autopropulsão*. 2009. 42 f. Monografia (Engenharia Naval e Oceânica) - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

CHUNG, T. J. *Computational fluid dynamics*. United Kingdom: Press Syndicate of the University of Cambridge, 2002. 1012 p.

CHITTENDEN, Cedar M.; FAUCHALD, Per., RIKARDBSEN, Audun H. Important open-ocean areas for northern Atlantic salmon (*Salmo salar*)—as estimated using a simple ambient-

temperature approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2012. v. 70, n. 1, p. 101-104.

DE LIMA, Camilla Hellen Peixoto. *Avaliação das Alterações Hidrológicas a Jusante de Barragens por Meio de Análise de Sensibilidade à Variação de Variáveis de Projeto*. 2014. 231 f. Dissertação (Mestrado Saneamento, Águas e Meio Ambiente) – Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2014.

DE METRIO, G. et al. Movements of bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L.) tagged in the Mediterranean Sea with pop-up satellite tags. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 2005. v. 58, n. 4, p. 1337-1340.

DE SOUZA, Luiz Guilherme Vieira Meira. *Estudo do Refino de Malha em um Modelo Computacional de Bomba de Cavidades Progressivas*. 2011. 55 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

DINIZ, Alexandre. *Apostila II Estatística Espacial: Geoprocessamento 2000*. Universidade Federal de Minas Gerais. 2000. Disponível em: <<http://csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/estespecial.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2105.

DONALDSON, Michael R. et al. Enhancing catch-and-release science with biotelemetry. *Fish and Fisheries*, 2008. v. 9, n. 1, p. 79-105.

DRUŽETA, Siniša et al. Investigation of the importance of spatial resolution for two-dimensional shallow-water model accuracy. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009. v. 135, n. 11, p. 917-925.

DUARTE, Bernardo Alan de Freitas. *Simulação numérica tridimensional de escoamentos livres: uma análise do trecho à jusante da usina hidrelétrica de Três Marias*. 2014. 98 f. (Mestrado Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

DUGAN, Patrick J. et al. Fish migration, dams, and loss of ecosystem services in the Mekong basin. *Ambio*, v. 39, n. 4, p. 344-348, 2010.

ESTACIO, Kemelli Campanharo. *Simulação do processo de moldagem por injeção 2d usando malhas não estruturadas*. 2004, 171f. Dissertação (Mestrado em Ciências de computação e matemática computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computacional, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

ESTEVEES, Francisco de Assis. *Fundamentos de limnologia*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 226 p.

FERZIGER, J.H; PERIC, M. Computational Methods for Fluid Dynamics. *Springer* 3.ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: 2002. 423 p.

FERRARI, Gaston E.; POLITANO, Marcela; WEBER, Larry. Numerical simulation of free surface flows on a fish bypass. *Computers & Fluids*, 2008. v. 38, n. 5, p. 997-1002.

FILL, Guilherme Campos. *Modelagem hidrodinâmica 3d de escoamentos em vertedouros*. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FLOW SINCE. Flow 3D. 2000-2015. Disponível em: <<http://www.flow3d.com/home/products/flow-3d>>. Acesso em> 28/08/2015.

GODØ, Olav Rune; MICHALSEN, Kathrine. Migratory behaviour of north-east Arctic cod, studied by use of data storage tags. *Fisheries Research*, v. 48, n. 2, p. 127-140, 2000.

GOODWIN, Richard Andrew. *et al.* Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian–Lagrangian–agent method (ELAM). *Ecological Modelling*, 2006. v. 192, n. 1, p. 197-223.

GOMES, Mateus das Neves *et al.* Modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante para a costa de Rio Grande. *Vetor*, Rio Grande, v.19, n.2, p. 58-73, 2009.

GONÇALVES, Nelson Daniel Ferreira. *Método dos Volumes Finitos em Malhas não estruturadas*. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Matemática) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007.

HUGHES, W.F.; BRIGHTON, J.A. *Dinâmica dos Fluidos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1974. 358 p.

HEUERT, Jenifer; KHATCHATOURIAN, Oleg. Iteração entre Jatos Transversais e Fluxo Principal: Simulação e Análise Comparativa de Modelos de Turbulência. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, FLORIANÓPOLIS. 2007.

JIE. Peixes com código de barra. 27/10/2009. Disponível em: <<http://jie.itaipu.gov.br/node/41564>>. Acesso em: 10 out. 2015.

KNIP, Danielle M.; HEUPEL, Michelle R.; SIMPFENDORFER, Colin A. Evaluating marine protected areas for the conservation of tropical coastal sharks. *Biological Conservation*, 2012. v. 148, n. 1, p. 200-209.

KLIMLEY, A.P. Why publish in Animal Biotelemetry? *Klimley Animal Biotelemetry* 2013, 1:1, p 3.

KUZMIN, Dmitri; MIERKA, Otto. On the implementation of the  $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretisation. *International Journal of Computing Science and Mathematics*, Germany, 2006. v. 1, n. 2-4, p. 193.

LHG. Laboratório de Hidrogeomorfologia da UFPR. 2015. Disponível em: <<http://www.lhg.ufpr.br/home/>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

MARTINS, Keyll Carlos Ribeiro. *Análise experimental, teórica e computacional do escoamento dos gases de exaustão no conversor catalítico platina/paládio instalado em um motor de combustão interna a etanol*. 2006. 214 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MEMÓRIA DA ELETRICIDADE. Políticas de governo e empresas públicas (1948-1963). Brasil 2015. Disponível em: <<http://www.memoriadaeletricidade.com.br/default.asp?pag=13&codTit1=44368&pagina=destaques/linha/1948-1963&menu=381&iEmpresa=Menu#44368>> Acesso em: 05 out. 2015.

MITAMURA, Hiromichi et al. Short-range homing in a site-specific fish: search and directed movements. *The Journal of experimental biology*, 2012. v. 215, n. 16, p. 2751-2759.

MUSYL, M. K. *et al.* Performance of pop-up satellite archival tags. *Marine Ecology Progress Series*, 2011. v. 433, p. 1-28.

NASCIMENTO, Júlio Cesar Santos. *Simulador de escoamento multifásico em poços de petróleo (SEMPP)*. 2013. 133 f. Mestrado (Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2013.

NIELSEN, Adam C. *Computational fluid dynamics applications for the Lake Washington Ship Canal*. 2011.106 f. These Master (Science degree in Civil and Environmental Engineering) - College of The University of Iowa, Iowa City, 2011.

NOTÍCIAS R7: Chuvas ainda não aliviam a seca em Minas. Minas Gerais 2014. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/minas-gerais/chuvas-ainda-nao-aliviam-a-seca-em-minas-02112014>> Acesso em: 20 out. 2015.

NIÑO, Y. Método de los Volúmenes Finitos. Apuntes CI71D Modelación Numérica en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 2002. 25 f. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. 2002.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2005 [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/NT\\_ONS-051\\_Revis%C3%A3o%201.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT_ONS-051_Revis%C3%A3o%201.pdf)> Acesso em: 19 out. 2015.

OPENFOAM. Features on OpenFoam 2011-2015. Disponível em: <<http://www.openfoam.org/features/>>. Acesso em: 28/08/2015.

PESSANHA, José EO; PORTUGAL, Carlos; PAZ, Alex A. Técnicas de solução de sistemas de equações diferenciais e algébricas: aplicação em sistemas de energia elétrica. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, 2005. v. 16, n. 3, p. 359-372.

PETRERE, Miguel. Fisheries in large tropical reservoirs in South America. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, v. 2, n. 1-2, p. 111-133, 1996.

PETRY, Adriane Prisco. *Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas*. 2002.135 f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

PIOVESAN, F.C. *Telemetria Aplicada na Mecanização Agrícola Utilizando o Datalogger Cr 1000*. 2008. 58 f. Monografia (Curso de Ciência da Computação) - Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

POFF, N. Le Roy; ZIMMERMAN, Julie KH. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, v. 55, n. 1, p. 194-205, June 2010.

POFF, N. Le Roy. *et al.* The natural flow regime. *BioScience*, p. 769-784, 1997.

POLITANO, Marcela; CARRICA, Pablo; WEBER, Larry. A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces. *International Journal of Multiphase Flow*, 2009. v. 35, n. 11, p. 1036-1050.

PRIEDE, I.G. 1988. Wildlife Telemetry: an introduction. In Wildlife Telemetry. Remote monitoring and tracking animals (Priede, I.G. and Swift, S.M., eds). Ellis Horwood Ltd.

RAMOS, Doalcey Antunes, 2007. Capítulo 3. Introdução ao Movimento dos Fluidos. Disponível em: <[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/doalcey/materiais/Cap\\_3\\_Cinematica\\_dos\\_fluidos\\_e\\_4\\_Equacoes\\_fundamentais.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/doalcey/materiais/Cap_3_Cinematica_dos_fluidos_e_4_Equacoes_fundamentais.pdf)>. Acesso em: 14/11/2015.

RIKARSEN, Audun H.; DISERUD, Ola H.; ELLIOT, J. M; DEMPSON, J.B.; STURLAUGSSON, J.; JENSEN, Arne J. The marine temperature and depth preferences of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) and sea trout (*Salmo trutta*), as recorded by data storage tags. *Fisheries Oceanography*, 2007. v. 16, n. 5, p. 436-447.

ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. *Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental: Métodos numéricos em recursos hídricos*, v. 5, p. 1-166, Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica PEnO-COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. (Pdf) 2001. Disponível em: <[http://www5.ensp.fiocruz.br/biblioteca/dados/MNRH5\\_PCCRosman.pdf](http://www5.ensp.fiocruz.br/biblioteca/dados/MNRH5_PCCRosman.pdf)>. Acesso em: 14/07/2015.

RODRIGUES, Andriago. *Estatística espacial e análise de cluster em dados de desastres naturais: mapeamento das estiagens e inundações no Rio Grande do Sul entre 2003 e 2009*. 2011. 77 f. Monografia (Estatística) - Instituto de Matemática. Departamento de Estatística. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ROSA, Eugênio S. *Escoamento multifásico isotérmico: modelos de multfluidos e de mistura*. Porto Alegre. Bookman, 2012. Disponível em: <<https://books.google.es/books?hl=pt-BR&lr=&id=hJRe3X2sDhIC&oi=fnd&pg=PP5&dq=significado+de+escoamento+multifasico&ots=5DQs1JWHvN&sig=B1kh9ZXXxBrgjb9cRhAPuz32Fkw#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 14/07/2015.

SALEH JAMAL. *Fluid Flow Handbook*. New York: McGraw-Hill United States of America, 2002.

SANTOS, Hersília Andrade [Fotos]. [Três Marias]: Ed. do Autor, [2011]. 5 fotos originais.

SÃO FRANCISCO. Mortandade de Peixes em Três Marias. Francisco Neto. 11 abr. 2007. Disponível em: <<http://www.sfrancisco.bio.br/noticias/morte3marias.html>>. Acesso em: 02 mai. 2015.

SAMPAIO, Francisco Alexandre Costa. *Influência da variação de vazões sobre a comunidade de peixes a jusante de um reservatório brasileiro*. 2013. 178 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2013.

SCHNEIDER, Fábio Alencar; MALISKA, Clovis Raimundo. Uma Formulação em Volumes Finitos usando Malhas Não-Estruturadas. In: VIII ENCIT-ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 2000, 10 p.

SOARES, Igor Prata. *Movimento de malhas e remalhamento de malhas superficiais*. 2007. 198 f. Tese de Doutorado (Ciências da computação e matemática computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2007.

SOLANO, Daniela Soledad Tapia. [Foto]. [Foz do Iguaçu]: Ed. do Autor, [2015]. 1 foto original.

SOLEIRO, Andres. Capa Limite em CFD. yPlus (y+). 2010. Disponível em: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5295/fichero/1.+INTRODUCCION.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2016.

SØRENSEN, Dan Nørtoft; NIELSEN, Peter Vilhelm. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments. *Indoor air*, 2003. v. 13, n. 1, p. 2-17.

SOQ. ELETRÓLISE. 2015. Disponível em: <<http://www.soq.com.br/conteudos/em/eletroquimica/p4.php>>. Acesso em: 11 out. 2015

SOUZA JÚNIOR, Wilson; REID, John; LEITÃO, Neidja.. Custos e benefícios do Complexo hidrelétrico Belo Monte: uma abordagem econômico ambiental. 2006.

STAR ODDI. Data Storage Tags (DST). Disponível em: <[http://www.easyfairs.com/uploads/tx\\_ef/DST-Brochure-FINAL.pdf](http://www.easyfairs.com/uploads/tx_ef/DST-Brochure-FINAL.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2015.

SUZUKI, Fabio Mineo. *Estudo do comportamento de peixes no canal de fuga da usina Hidrelétrica de Três Marias utilizando telemetria acústica*. 2014. 94 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

TAVARES, Nelson. *Simulação energética de edifícios, energia geotérmica e estudo de ventilação por CFD*. 2011. 238 f. Dissertação de Mestrado em Energia - Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, 2011.

TAGUCHI, Masashige; LIAO, James C. Rainbow trout consume less oxygen in turbulence: the energetics of swimming behaviors at different speeds. *The Journal of experimental biology*, 2011. v. 214, n. 9, p. 1428-1436.

THORSTAD, E. B. et al. Upstream migration of Atlantic salmon at a power station on the River Nidelva, Southern Norway. *Fisheries Management and Ecology*, 2003 v. 10, n. 3, p. 139-146.

THORSTAD, Eva B. et al. The Use of Electronic Tags in Fish Research—An Overview of Fish Telemetry Methods. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013. v. 13, p. 881-896.

TIRONI-SILVA, Antonio; MARIN, Víctor H.; DELGADO, Luisa E. An hydrodynamic model of rio cruces wetland: calculation of residence time using mohid. *Aqua-LAC Vol. 6 - Nº 2 - Set. 2014. pp. 50 - 5.*

URBAN, A. L.; GULLIVER, J. S.; JOHNSON, D. W. Modeling total dissolved gas concentration downstream of spillways. *Journal of hydraulic engineering*, 2008. v. 134, n. 5, p. 550-561.

VASGEO. Sistema de Informação Geográfica. 2011-2015. Disponível em: <<http://www.vasgeo.com.br/p/tutoriais-de-geoprocessamento.html>>. Acesso em: 14 out. 2105.

VOROSMARTY, C. J.; SHARMA, K. P.; FEKETE, B. M.; COPELAND, A. H.; HOLDEN, J.; MARBLE J.; LOUGH J. A. The Storage and Aging of Continental Runoff in Large Reservoir Systems of the World. *Ambio*, Vol. 26, nº 4, p. 210- 219, June 1997.

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

WHITE, Frank M. *Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill do Brasil, 2011. 880 p.

XAVIER, Manoel Lucas Machado; DE LIMA, Paulo Henrique Silva; JANZEN, Johannes Gérson. Impacto da configuração de entrada e saída sobre a mistura em reservatórios de armazenamento de água. *Eng. sanit. ambient*, v. 19, n. 3, p. 315-324, 2014.