

UFPA

PPGEC

Universidade Federal
do Pará



Josias da Silva Cruz

MODELO VAZÃO-VELOCIDADE PARA AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Josias da Silva Cruz

**MODELO VAZÃO-VELOCIDADE PARA AVALIAÇÃO DE POTENCIAL
HIDROCINÉTICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistemas de Biblioteca da UFPA**

Cruz, Josias da Silva, 1975-

Modelo vazão-velocidade para avaliação de potencial hidrocínético/ Josias da Silva Cruz.- 2018.

Orientador: Claudio José Cavalcante Blanco

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2018.

1. Hidrologia 2. Bacias hidrográficas 3. Recursos hídricos 4. Medidores de fluxo- Modelos matemáticos I.
Título

CDD 22.ed. 551.48



MODELO VAZÃO-VELOCIDADE PARA AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO

AUTOR:

JOSIAS DA SILVA CRUZ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL.

APROVADO EM: 25 / 05 / 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Claudio Jose Cavalcante Blanco, Ph.D.
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil Junior
Membro Externo (UnB)

Prof. Dr. Nélio Moura de Figueiredo
Membro Externo (UFPA)

Prof. Dr. Francisco Carlos Lira Pessoa
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico este trabalho a minha família, amigos e a todas as pessoas que contribuíram até agora.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me fazer acreditar que tudo é possível. Assim, esta etapa da minha vida chega ao término conforme sua vontade.

A minha mãe, Francisca Cruz, pelo apoio e amor incondicional desde a infância até os dias atuais.

Ao meu Pai, José Cruz, que não está mais aqui, mas, me ensinou o valor do conhecimento, da honestidade e humildade.

A minha companheira Lane, que sempre me deu apoio e nunca me deixou desistir, estando ao meu lado nos momentos bons e difíceis.

A toda a minha família, em especial à minha sobrinha Franciane Cruz, que sempre me incentivou à carreira acadêmica.

Ao professor Claudio José Cavalcante Blanco, por ter me dado a oportunidade de realizar um trabalho desafiador, por sua motivação, compartilhamento de conhecimento, pela confiança e respeito.

Aos professores Nélio Moura de Figueiredo e Francisco Carlos Lira Pessoa que contribuíram com seus conhecimentos científicos para este estudo durante a qualificação.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Aos amigos que conheci no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPA, em especial Eduardo Aguiar, Laila Rover, Roberto Correa, Evanice Gomes, Vanessa Watrin e Mayke Progênio.

A Sanny Assis, técnica administrativa da secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

A CAPES pela ajuda financeira traduzida por meio da concessão da bolsa de estudo.

A todos que não foram citados, mas que também contribuíram direta e indiretamente para que eu concluísse o mestrado, o meu mais sincero agradecimento.

“A limitação do homem é acreditar no impossível.”

- Autoria Própria

RESUMO

A rede de informações hidrológicas brasileira disponibiliza dados de vazões diários, contudo, as informações de velocidades diárias não estão disponíveis em séries históricas. O inventário de velocidades dos rios é importante para muitas aplicações, e uma delas é o estudo de potencial hidrocínético, inclusive a jusante de centrais hidrelétricas. Portanto, o trabalho propõe um modelo denominado Vazão-Velocidade que determina a velocidade média diária, a forma geométrica e a distribuição do perfil logarítmico de velocidade da seção transversal de rios a partir de dados de vazão diária. O modelo foi aplicado inicialmente em uma pequena bacia hidrográfica com dados de vazão e a validação foi realizada utilizando o erro médio quadrático – RMSE, o erro médio quadrático relativo - RRMSE, a razão do desvio padrão de observação – RSR e a porcentagem de viés – PBIAS. Posteriormente, o modelo foi aplicado às bacias hidrográficas dos rios Amazonas, São Francisco e Paraná (maiores bacias do Brasil), usando a maior e menor vazão da série histórica. A maior e menor velocidade média encontrada no rio Amazonas foi de $2,27 \text{ ms}^{-1}$ e $0,735 \text{ ms}^{-1}$ na seção transversal de Óbidos para uma vazão de $266\,897 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $72\,480 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Os principais contribuintes do rio Amazonas, com exceções dos rios Trombetas, Madeira e Xingu, apresentam velocidades médias diárias abaixo de 2 ms^{-1} para o período de cheia, porém, no período de estiagem as velocidades médias diárias de todos são abaixo de $0,5 \text{ ms}^{-1}$. O rio São Francisco, nas seções transversais estudadas ao longo de sua extensão, apresenta velocidades entre $3,087 \text{ ms}^{-1}$ a $1,679 \text{ ms}^{-1}$ para o período de cheia e no período de estiagem as velocidades estão entre $0,437 \text{ ms}^{-1}$ a $0,116 \text{ ms}^{-1}$. Já no rio Paraná, as velocidades estão entre $2,167 \text{ ms}^{-1}$ a $1,504 \text{ ms}^{-1}$ e $0,594 \text{ ms}^{-1}$ a $0,118 \text{ ms}^{-1}$ para a maior e menor vazão, na devida ordem. Verificou-se que o rio Amazonas tem potencial hidrocínético que pode ser explorado durante o ano todo. Na bacia do São Francisco, somente no período de maiores vazões há potencial para a instalação de turbinas hidrocínéticas, idem para a bacia do rio Paraná. É claro que, em pontos dos rios onde existam centrais hidrelétricas essa avaliação deve mudar devido ao despacho das centrais.

Palavras-chave: Forma Geométrica; Turbinas Hidrocínéticas; Inventário de Velocidade.

ABSTRACT

The Brazilian hydrological information network provides daily flow data; however, daily velocity information is not available in historical series. The inventory of river velocities is important for many applications, and one of them is the study of hydrokinetic potential, including downstream of hydroelectric plants. Therefore, the work proposes a model called Flow-Velocity that determines the average daily velocity, the geometric form and the distribution of the logarithmic velocity profile of the cross section of rivers from daily flow data. The model was initially applied in a small river basin with flow data and the validation was performed using the mean square error (RMSE), the relative mean square error (RRMSE), the standard deviation of observation (RSR) and the percentage of bias PBIAS. Subsequently, the model was applied to the river basins of the Amazonas, São Francisco and Paraná rivers (Brazil's largest basins), using the highest and lowest flows in the historical series. The highest and lowest average speed found in the Amazon River was 2.27 ms⁻¹ and 0.735 ms⁻¹ in the Óbidos cross-section for a flow of 266 897 m³s⁻¹ and 72 480 m³s⁻¹, respectively. The main contributors to the Amazon River, with the exception of the Trombetas, Madeira and Xingu rivers, present average daily speeds below 2 ms⁻¹ for the flood period, but in the dry season the average daily speeds of all are below 0.5 ms⁻¹. The São Francisco river, in the transversal sections studied along its length, presents velocities between 3.09 ms⁻¹ to 1.68 ms⁻¹ for the period of flood and in the period of drought the speeds are between 0,44 ms⁻¹ to 0,12 ms⁻¹. In the Paraná River, velocities are between 2.17 ms⁻¹ to 1.50 ms⁻¹ and 0,59 ms⁻¹ to 0,12 ms⁻¹ for the greater and smaller flow, in due order. It was verified that the Amazon river has hydrokinetic potential that can be explored all year round. In the São Francisco basin, it is only in the period of higher flows that there is potential for the installation of hydrokinetic turbines, similar to the Paraná river basin. Of course, at points in rivers where there are hydroelectric plants, this assessment should change due to the dispatch of power plants.

Keywords: Geometric Form; Hydrokinetic Turbines; Inventory of Velocity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da seção transversal de um rio utilizando o método de um ponto.	18
Figura 2 – Ilustração da seção transversal de um rio utilizando o método de dois pontos para mensurar vazão.	18
Figura 3 – Representação de isolinhas de velocidade em uma seção transversal de rio.	19
Figura 4 – representação gráfica de aplicação do método da seção média.	19
Figura 5 - Matriz energética brasileira.	20
Figura 6 - Participação de cada fonte geradora de energia elétrica.	21
Figura 7 – participação por tipo na geração hidrelétrica brasileira.	21
Figura 8 – Potencial hidrelétrico por estados do Brasil.	23
Figura 9 – Aproveitamento hidrelétrico brasileiro.	24
Figura 10 - Potencial instalado na região Norte.	25
Figura 11– Locais onde serão instaladas novas unidades geradoras.	25
Figura 12– Turbinas de eixo horizontal (axiais).	27
Figura 13 – Turbinas de eixo horizontal (axiais).	28
Figura 14– Fluxograma de metodologia.	30
Figura 15 – Localização da estação fluviométrica Marambaia – 31600000.	34
Figura 16– Localização das estações fluviométricas utilizadas no modelo Vazão-velocidade.	35
Figura 17 – Bacia do rio São Francisco.	36
Figura 18 – Bacia hidrográfica do rio Paraná.	36
Figura 19 - Velocidade simulada, vazão observada e simulada do igarapé da Prata.	38
Figura 20 - Velocidade simulada, vazão observada e simulada do rio Tapajós.	39
Figura 21 – Isolinhas de velocidade a partir do maior dado de vazão ($2,66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).	40
Figura 22 – Isolinhas de velocidade normalizada a partir da maior vazão.	40
Figura 23 – Isolinhas de velocidade a partir do menor dado de vazão ($0,29 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).	41
Figura 24 – Isolinhas de velocidade normalizada a partir da menor vazão.	41
Figura 25 – Forma geométrica da seção transversal resultante do modelo.	42
Figura 26 – Isolinhas de velocidade da seção transversal do rio Amazonas a partir da maior vazão ($291\,900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).	42
Figura 27 – Isolinhas de velocidade da seção transversal do rio Amazonas a partir da maior vazão ($72\,480 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).	43
Figura 28 – Medição de ADCP: seção transversal e distribuição de velocidade na seção Rio Amazonas em Óbidos, Brasil, 16/12/2003.	44
Figura 29 – Possível forma geométrica da seção transversal do rio Amazonas.	45
Figura 30 – Isolinhas de velocidade da seção transversal da estação 44290002 para maior vazão	53
Figura 31 – Isolinhas de velocidade da seção transversal da estação 44290002 para menor vazão ...	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados dos parâmetros de desempenho aplicados ao modelo.	39
Tabela 2 - Resultados da utilização do modelo Vazão-Velocidade no rio Amazonas.	45
Tabela 3 - Resultados de velocidade dos afluentes do rio Amazonas.	47
Tabela 4 - Potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio Amazonas.	49
Tabela 5 - Resultados da Aplicação do modelo Vazão-velocidade em algumas estação do rio São Francisco.	52
Tabela 6 - Potência hidrocínética das seções transversais do rio São Francisco.	54
Tabela 7- Resultado de velocidades média diária simulada para a bacia Paraná.	55
Tabela 8 - Potência hidrocínética instalada das seções transversais do rio Paraná utilizadas no modelo.	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 GERAL.....	13
1.1.2 ESPECÍFICOS.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 ESCOAMENTO.....	14
2.2 VELOCIDADE	14
2.2.1 Distribuição transversal de velocidade	14
2.2.2 Linhas de mesma velocidade (isovelocidades)	15
2.3 RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO DE MATERIAL DO LEITO E MANNING.....	15
2.4 VAZÃO	17
2.5 APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO.....	21
2.6 ENERGIA HIDROcinÉTICA.....	26
2.6.1 Princípios de Operação	26
2.6.2 Turbinas Hidrocinéticas	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO	29
3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO	29
3.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO	31
3.3.1 Método da Seção Média Modificada	31
3.3.2 Ajuste do Modelo	32
3.3.3 Cálculo da Velocidade Média	32
3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO	32
3.4.1 Parâmetros do Desempenho	32
3.4.2 Validação	33
3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	34
3.6 FORMA GEOMÉTRICA DE CANAL NATURAL.....	34
3.7 BACIAS HIDROGRÁFICAS PARA APLICAÇÃO DO MODELO.....	34
3.9 ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROcinÉTICO	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38

4.1 INTRODUÇÃO	38
4.2 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO	38
4.3.1 Simulação de Velocidade com a Maior Vazão do Igarapé da Prata	39
4.3.2 Simulação de Velocidade com a Menor Vazão do Igarapé da Prata	41
4.3.3 Forma Geométrica	42
4.4 APLICAÇÃO DO MODELO NA BACIA AMAZÔNICA	42
4.4.1 Utilização do Modelo no Rio Amazonas	42
4.3.2 Forma Geométrica para a Seção da Estação Fluviométrica Óbidos	45
4.3.3 Afluentes do Rio Amazonas	46
4. 4 ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO	48
4.4.1 Bacia do Igarapé da Prata	48
4.4.2 Bacia Hidrográfica do rio Amazonas	48
4.5 REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	52
4. 5.1 Utilização do Modelo na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco	52
5.5.2 Estimativa de potencial na Bacia do Rio São Francisco	53
4.6 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ	55
4. 6.1 Utilização do Modelo na Bacia Hidrográfica do rio Paraná	55
5 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE B	74

1 INTRODUÇÃO

À medida que a sociedade busca fontes de energia renováveis e sustentáveis para atender as crescentes demandas, as centrais hidrocinéticas têm recebido atenção crescente (PETRIE et al., 2014). Outro fator importante, que levou a comunidade científica a pesquisar fontes de energias alternativas, foi a busca pela minimização dos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis. Assim, o uso de energia marinha e fluvial tem sido preeminente neste contexto (LOPES et al., 2015). A utilização de energia hidrocinética, em todas as suas aplicações, foi considerada como um processo de conversão de energia com baixo impacto ambiental, que poderia aumentar o potencial energético dos países, principalmente aqueles em desenvolvimento, que necessitam de energia para superar os desafios do crescimento (HOLANDA et al., 2017). Dentro deste cenário, cada país avalia seus recursos e muitos reconheceram a energia hidrocinética como um contribuinte significativo para seu portfólio de energia renovável (LAWS e EPPS, 2016).

No Brasil, segundo Van Els e Brasil Junior (2015), a partir da década de 80, iniciaram-se as primeiras pesquisas, de forma empírica, voltadas para o desenvolvimento de produção de energia elétrica usando turbina hidrocinética. Atualmente, os estudos têm verificado o aproveitamento de energia remanescente de usinas hidrelétricas, neste sentido, Holanda et al. (2017), apresentaram em seu trabalho um modelo hidrodinâmico bidimensional para verificar o aproveitamento de energia hidrocinética à jusante da usina hidrelétrica de Tucuruí, visto que esta tem a maior capacidade instalada em território nacional e durante a sua implantação causou um grande impacto ambiental. De acordo com esses autores, a implantação de um parque de energia hidrocinética, no trecho avaliado, poderia gerar 2,04 GWh/ano, sendo este, um valor considerável para um recurso energético não aproveitado.

Uma informação de fundamental importância para verificar a viabilidade de implantação de centrais hidrocinéticas é a velocidade. Pois, a potência instalada da central é determinada em função da velocidade de projeto da turbina, a qual é função do campo de velocidade de seções transversais de rios. Além disso, estimar a velocidade em rios é necessário para a engenharia hidráulica e estudos hidrológicos (GORING et al., 1997). Para Pektas (2015), a determinação de distribuições de velocidade em toda a seção transversal é de importância vital para o planejamento das formas geométricas dos canais; o cálculo das propriedades de escoamento; e a

previsão do transporte de sedimentos e contaminantes. Entretanto, de acordo com Bonakdari (2012), as medições de velocidades diretas não são viáveis em muitos casos reais.

A Agência Nacional de Águas (ANA), em seu site (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>) com acesso livre ao público, disponibiliza séries de dados hidrológicos (vazão, nível de água, concentração de sedimentos, etc.). No entanto, as séries de dados de velocidades dos rios não estão disponíveis. Os motivos para este fato são os mais diversos, que variam desde custo financeiro elevado à dificuldade de acesso à área de estudo. Segundo Sivapragasam e Muttill (2005), as vazões são calculadas a partir de medição de velocidade e são relacionadas com as medidas de réguas linimétricas para obtenção de curva-chave. Assim, obtém-se uma equação de lei de potência para estimar a vazão, tendo como variável conhecida o nível de água, pois, para Maghrebi e Ahmadi (2017), é mais difícil mensurar vazão de rios do que de nível.

Portanto, devido à importância de conhecer os valores de velocidade em rios para muitos estudos de recursos hídricos e projetos hidráulicos, sobretudo, os de geração de energia hidrocínética, tem-se como objetivo do estudo, estimar os valores de velocidade a partir de dados de vazão, concebendo-se para isso um modelo vazão-velocidade.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Desenvolver metodologia para concepção de um modelo vazão-velocidade para estimativas de velocidade média diária em seções de rios a partir de dados de vazão para análise de potencial hidrocínético.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- Estimar a área e a forma geométrica da seção transversal do rio;
- Estimar o d_{50} do material do leito do rio e o limite de rugosidade;
- Calcular a velocidade de cisalhamento;
- Distribuir a velocidade logarítmica a 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 de profundidade;
- Avaliar o potencial hidrocínético em rios brasileiros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESCOAMENTO

O deflúvio em rios é dito escoamento de superfície livre. Segundo Porto (2006), este tipo de escoamento ocorre pela ação da gravidade. Entretanto, existe uma série de variáveis que governam as equações que descrevem o fluxo de um rio, diferente dos canais artificiais que têm a geometria da seção transversal, a declividade e a rugosidade do material bem definidos. Nos rios estas variáveis são difíceis de estimar, pois, variam no tempo e no espaço. De acordo com Rahimpour (2017), a componente velocidade descreve o fluxo do escoamento, porém a velocidade em uma seção transversal varia de um ponto a outro.

2.2 VELOCIDADE

2.2.1 Distribuição transversal de velocidade

Há décadas a distribuição de velocidade em rios é pesquisada (MAGHREBI e RAHIMPOUR, 2005). Logo, a literatura inclui muitos estudos experimentais e analíticos conduzidos para determinar a distribuição de velocidade em canais naturais e laboratoriais (PEKTAS, 2015). Contudo, na maioria dos casos, os perfis de velocidade em rios são expressos por lei logarítmica ou de potência (LEE et al., 2013). De acordo com Maghrebi (2006) e Petrie et al. (2014), a distribuição da velocidade em escoamento bidimensional sobre um leito totalmente áspero é usualmente seguindo a lei logarítmica.

Estudos mostram que a distribuição transversal de velocidade é influenciada pela rugosidade do leito e pela parede do canal (PEKTAS, 2015). Neste caso, a Equação 1 pode ser usada para determinar os campos de velocidade de regime laminar e turbulento. Assim, a resolução desta, resulta na lei logarítmica (Equação 2).

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_*}{ky} \quad (1)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \quad (2)$$

Com

$$y_0 = k_s e^{-k.A} \quad (3)$$

Em que u é a velocidade local medida à distância normal y do leito; $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ é a velocidade de cisalhamento no limite, τ_0 é a tensão de cisalhamento limite

e ρ massa específica do fluido; y_0 é a distância limite da parede onde $u = 0$, k é a constante de Von-Kármán = 0,41 para água; k_s é a altura equivalente da rugosidade da areia de Nikuradse = $2d_{50}$ e d_{50} é o diâmetro médio do material do leito; e A é a constante de integração = 8,5 para escoamento totalmente desenvolvido.

A Lei de Potência (Equação 4) derivada por Chen (1991) a partir de uma equação diferencial parcial em termo de u/u_* , é outro modelo utilizado para a distribuição de velocidade em seção transversal de canal aberto (MAGHREBI e RAHIMPOUR, 2005; PEKTAS, 2015).

$$\frac{u}{u_*} = a \left(\frac{y}{y_0} \right)^m \quad (4)$$

Sendo a um coeficiente e m um expoente que variam com o número de Reynolds global para fluxo hidraulicamente liso ou com a rugosidade global relativa para escoamento turbulento. Os valores do expoente m variam entre 1/12 e 1/4, dependendo da intensidade da turbulência do escoamento; porém, $m = 1/7$ é um valor encontrado que concorda bem com um grande número de medições experimentais de perfis de velocidade (MAGHREBI e RAHIMPOUR, 2005).

2.2.2 Linhas de mesma velocidade (isovelocidades)

Para traçar as linhas de mesma velocidade é necessário fazer medições de velocidades em vários pontos da seção transversal do rio. Maghrebi e Rahimpour (2005) propuseram um modelo simples para a produção de linhas de iguais velocidades sem dimensões em fluxo de canais abertos que pode ser utilizado para estimativa de vazão com uma única medida de velocidade. Neste modelo, as isolinhas de velocidades são produzidas a partir da relação entre a velocidade pontual (u_i) e a velocidade média (U), sendo assim chamada de velocidade normalizada (V), dada pela Equação 5.

$$V = \frac{u_i}{U} \quad (5)$$

2.3 RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO DE MATERIAL DO LEITO E MANNING

A equação de Chezy, com o coeficiente de Manning (n) determinado empiricamente, tem sido usada em aplicações hidráulicas. Em condição estacionária e fluxo uniforme, os resultados podem ser obtidos pela Equação 6 (LIMERINOS, 1970).

$$V = \frac{1,486 R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (6)$$

Sendo V a velocidade média; R o raio hidráulico, que é obtido da relação perímetro molhado com área molhada da seção; S a declividade; e n o coeficiente de rugosidade de Manning.

A Equação 6, também conhecida como a “formula de Manning” tem sido usada para calcular a velocidade de fluxo em canais naturais, porém, o coeficiente n , mesmo existindo tabelas com valores confiáveis, não é fácil de determinar para os rios, pois depende muito da experiência de quem utiliza, assim sendo, é determinado de modo subjetivo. O tamanho da partícula do leito é um fator que pode ser determinado com maior precisão do que outros parâmetros que influenciam a velocidade do fluxo de rios. Assim, Limerinos buscou relacionar o coeficiente de Manning com o tamanho das partículas do leito. Mas, antes dele, Strickler derivou a Equação 7 para o coeficiente de Manning para camadas do leito com pedras e pedregulho (LIMERINOS, 1970).

$$n = 0,039d_{50}^{1/6} \quad (7)$$

Sendo d_{50} o diâmetro médio do material do leito.

O estudo de Limerinos (1970) coletou amostras de dois locais, onde foi estabelecido um sistema de grades na direção transversal e longitudinal do rio para obter 100 interseções. Em cada interseção foram coletadas amostras de onde foram separados os diâmetros mínimos, intermediários e máximos. Assim, de cada tamanho de partículas foram retirados os percentis de 84, 50 e 16. A frequência de distribuição cumulativa dos percentis do diâmetro mínimos e médios das partículas do leito relacionadas com o coeficiente de Manning resultou em seis equações, a saber: Equação 8 descreve a relação com o diâmetro mínimo (d'_{84}); a Equação 9 descreve a relação do diâmetro intermediário (d''_{84}); Equação 10 descreve a relação com o diâmetro mínimo (d'_{50}); a Equação 11 descreve a relação com o diâmetro intermediário (d''_{50}); a Equação 12 descreve a relação com o diâmetro mínimo (d'_{16}); e a Equação 13 descreve a relação com o diâmetro intermediário (d''_{16}).

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0,0926}{0,76 + 2 \log \frac{R}{d'_{84}}} \quad (8)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0,0926}{1,16 + 2 \log \frac{R}{d''_{84}}} \quad (9)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0,0926}{2 \log_{d/50} \frac{R}{d}} \quad (10)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0,0926}{0,35 + 2 \log_{d/50} \frac{R}{d}} \quad (11)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0,0926}{0,25 + 1,33 \log_{d/16} \frac{R}{d}} \quad (12)$$

$$\frac{n}{R^{1/6}} = \frac{0,0926}{0,1 + 1,6 \log_{d/16} \frac{R}{d}} \quad (13)$$

Em que o raio hidráulico (R) e diâmetro (d) do material do leito são dados em pés (ft).

2.4 VAZÃO

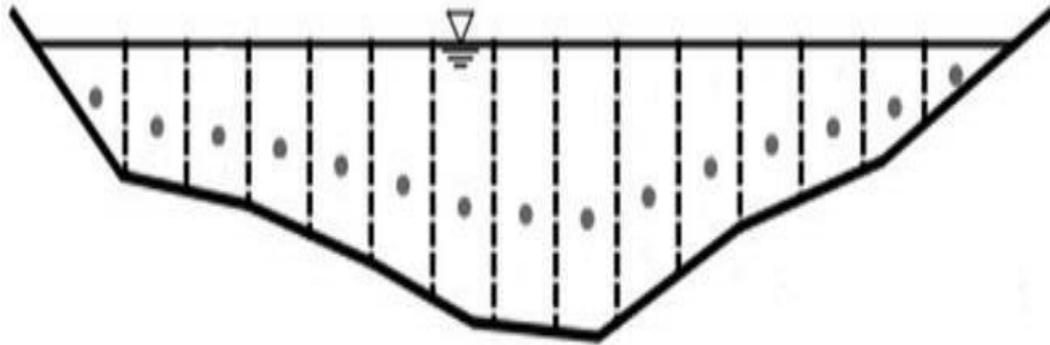
Conceitualmente, em recurso hídrico, a vazão é o volume de água que passa em determinada seção transversal de um conduto, que pode ser livre ou fechado (FARINA et al., 2017). De acordo com Farina et al. (2017) e Maghrebi (2006), a vazão de um rio pode ser calculada pelo produto da velocidade média com a área da seção transversal. Portanto, é preciso fazer medição de profundidade para determinar a área da seção transversal e determinar a velocidade média (MAGHREBI, 2006). Assim, utilizando a Equação 14, é estimada a vazão total.

$$Q = \sum_A u_i A_i \quad (14)$$

Sendo Q a vazão, u_i velocidade pontual medida em cada vertical e A_i a área de cada subseção em que a seção transversal do rio é dividida.

Muitos métodos são utilizados para estimar a vazão. Segundo Maghrebi (2005), muitos são baseados em medições de um ou dois pontos de velocidades. No método de um ponto (Figura 1), a largura da seção transversal do rio é dividida em segmentos regulares. Nesse caso, em cada segmento, é medida a profundidade (y) e a velocidade a $0,6y$ a partir da superfície; esta é considerada uma velocidade média (MAGHREBI, 2005). Então, a área de cada subseção é calculada utilizando a largura do segmento e a profundidade. Assim, fazendo o somatório do produto da velocidade com a área de cada subseção, calcula-se a vazão.

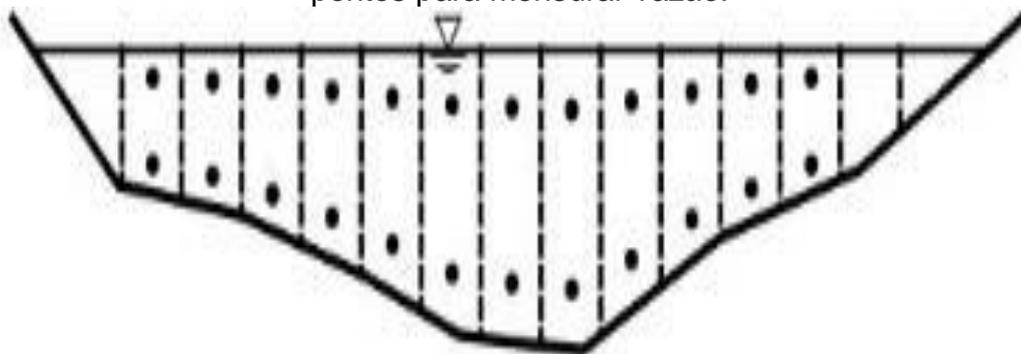
Figura 1 – Ilustração da seção transversal de um rio utilizando o método de um ponto.



Fonte: Adaptado de Maghrebi, 2005.

O método de dois pontos (Figura 2) segue os mesmos passos do método de um ponto, diferencia-se deste pelas medições de velocidades, que são mensuradas a $0,2y$ e $0,8y$; a velocidade média na direção vertical é assumida como a média aritmética entre as duas velocidades (MAGHREBI, 2005).

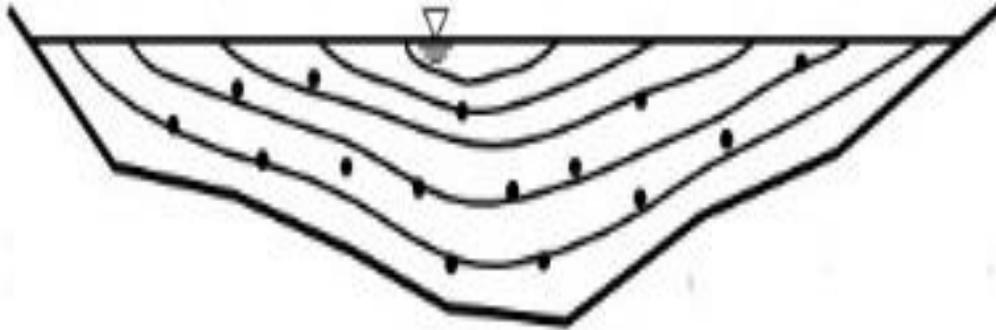
Figura 2 – Ilustração da seção transversal de um rio utilizando o método de dois pontos para mensurar vazão.



Fonte: Adaptado de Maghrebi, 2005.

Também é possível estimar a vazão com o método das isolinhas de velocidade. Estas são produzidas pela relação da velocidade pontual com a velocidade média de cada vertical. Portanto, são utilizados os seguintes passos: medir a largura e dividir em segmentos; medir a profundidade; mensurar a velocidade em vários pontos de cada vertical, sendo estes pontos espaçados de maneira regular. Assim, o valor de cada isolinha (Figura 3) é multiplicado pela área de influência da mesma, que somados resulta na vazão total (MAGHREBI, 2005).

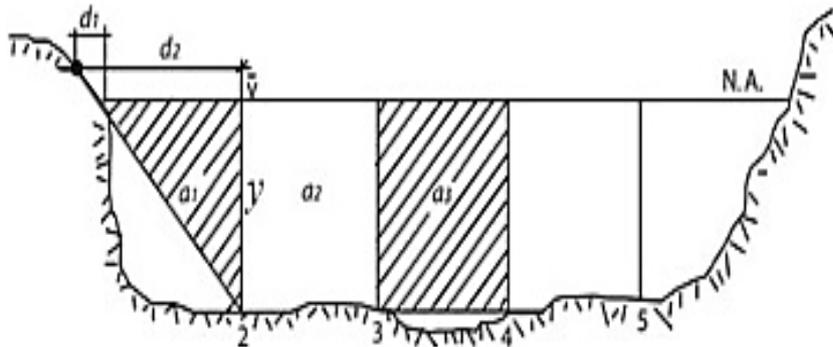
Figura 3 – Representação de isolinhas de velocidade em uma seção transversal de rio.



Fonte: Adaptado de Maghrebi, 2005.

O método da seção média (Figura 4) consiste em: dividir o eixo transversal do rio em tamanhos regulares; medir a profundidade e a velocidade em cada vertical; calcular a área das subseções (Equação 15); calcular a velocidade média (Equação 16) de cada subseção; com o resultado da velocidade média, calcular a vazão (q_i) de cada subseção (Equação 17); calcular a vazão total (Equação 18)

Figura 4 – representação gráfica de aplicação do método da seção média.



Fonte: Agência Nacional de Águas – ANA, 2014.

$$a_1 = (d_2 - d_1) \left(\frac{y_2 + y_1}{2} \right) \quad (15)$$

Sendo a_1 , a área do segmento; d_2 , a distância da vertical posterior em relação à margem; d_1 , a distância anterior em relação à margem; y_1 e y_2 , a profundidade das verticais.

$$U_{a1} = \frac{U_{y1} + U_{y2}}{2} \quad (16)$$

Em que U_{a1} , a velocidade média do segmento; u_{y1} e u_{y2} , a velocidade média das verticais.

$$q_i = a_1 U_{a1} \quad (17)$$

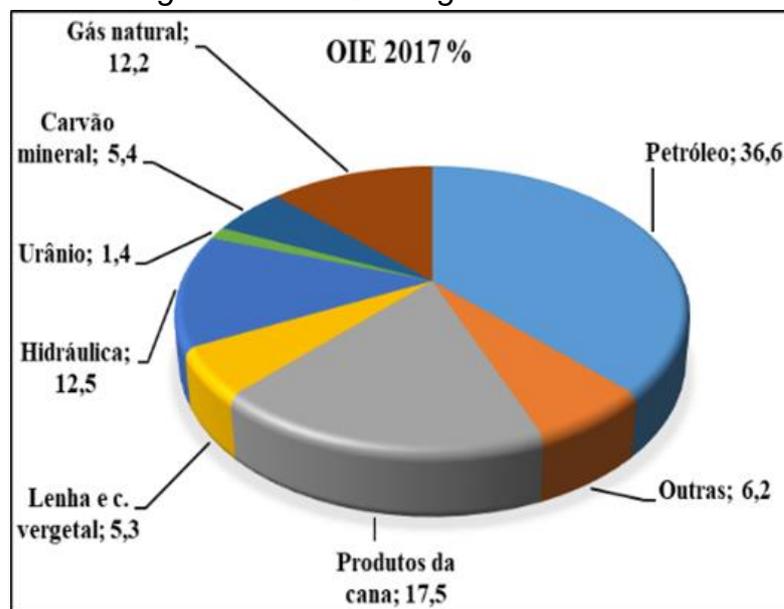
$$Q = \sum q_i \quad (18)$$

Sendo, q_i , a vazão média da subseção; Q , a vazão total.

2.5 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A Figura 5 apresenta a oferta interna de energia (OIE). De acordo com a estimativa do Ministério de Minas e Energia (2017) a OIE terá uma taxa de crescimento de 1,7% para o ano de 2017 em relação ao ano de 2016. O petróleo é a principal fonte energética brasileira, participando com um percentual de 36,6 %, em contrapartida a fonte hidráulica participa com 12,5 %, o que pode ser considerado pouco, frente à quantidade de recurso hídrico que o país apresenta.

Figura 5 - Matriz energética brasileira.

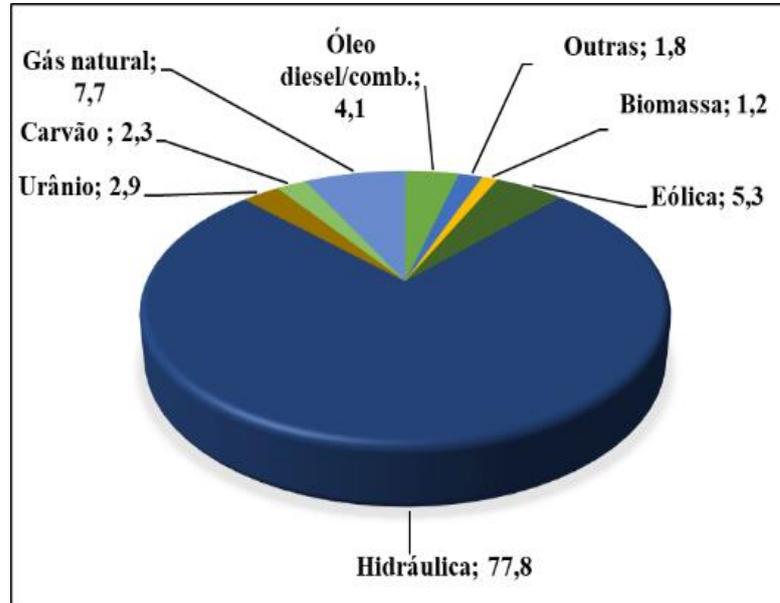


Fonte: Ministério de Minas e Energia – MME (2017).

Entretanto, quando se trata de energia elétrica, a fonte hidráulica tem a maior participação na geração de energia (Figura 6). Todavia, dentro desta porcentagem hidráulica, o tipo de unidade geradora que mais aproveita o potencial hidroelétrico são as usinas hidrelétricas (UHE), enquanto as centrais geradoras hidrelétricas (CGH) têm uma pequena contribuição na geração de energia elétrica e a geração de energia utilizando turbinas hidrocínica não é contabilizada, por ser praticamente inexistente, fato que pode ser constatado na Figura 7. Portanto, é importante haver um aumento na geração de energia elétrica a partir de CGH e hidrocínica, pois este tipo de

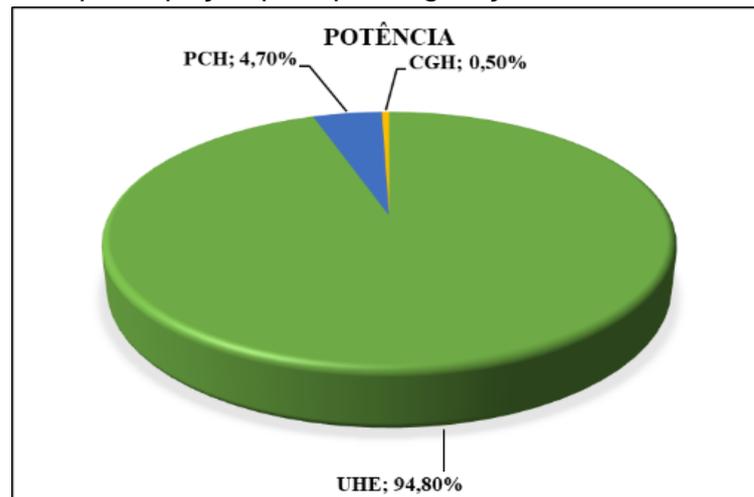
tecnologia impacta menos o meio ambiente e pode alcançar comunidades mais afastadas dos grandes centros de distribuição.

Figura 6 - Participação de cada fonte geradora de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

Figura 7 – participação por tipo na geração hidrelétrica brasileira.



Fonte: Adaptado de ANEEL, 2017.

2.5 APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO

O uso de recursos hídricos para a geração de energia elétrica pode ser feito com a construção de barragens, que elevam o volume de água e aumentam o desnível em relação à localização da turbina. Assim, a energia potencial da água transformada em energia cinética movimenta as pás da turbina, que conectada a um gerador, converte a energia mecânica em elétrica. Outra maneira de aproveitar a energia contida na água é a instalação de turbinas hidrocinéticas, ou seja, aproveita-se a

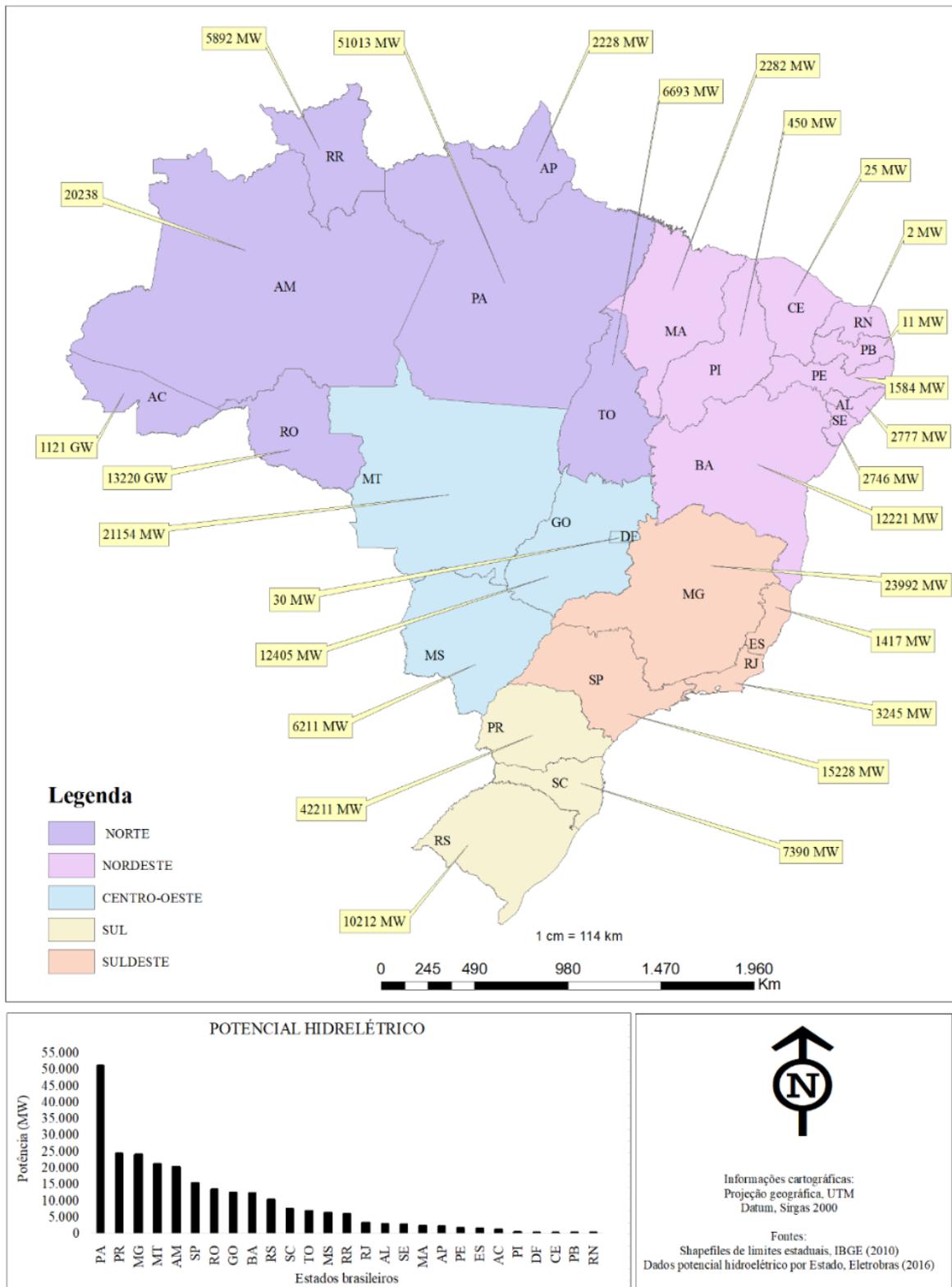
energia cinética do rio, para movimentar as pás da turbina, sem precisar elevar o nível de água.

O Brasil apresenta grande potencial hidrelétrico, tanto com a construção de barragens quanto com a instalação de turbinas hidrocinéticas. Atualmente, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – (ANEEL, 2017), o potencial hidrelétrico em operação, para os três tipos (Centrais Geradoras Hidrelétrica – CGH, Pequenas Centrais Hidrelétrica – PCH e Usina Hidrelétrica – UHE), é de 106,7 GW, sendo 101,17 GW para UHE; 4,976 GW para PCH; e 0,554 GW para CGH. Porém, de acordo com a Eletrobrás (2016), o potencial inventariado é de 247,997 GW, ou seja, é somente utilizado 43,02 % deste potencial.

A maior potência em operação por parte das UHE é evidente, pois a ANEEL classifica os tipos de geração de energia hidrelétrica de acordo com a sua potência. Portanto, esta classificação segue o seguinte critério: CGH, quando a potência instalada é de até 1MW; PCH, quando a potência é entre 1 MW e 30 MW; e UHE, quando a potência instalada é acima de 30 MW.

A Figura 8 apresenta a distribuição do potencial inventariado para cada estado brasileiro, na qual é possível verificar o maior potencial para o estado do Pará, sendo superior à soma do potencial dos estados do Paraná e Minas Gerais que são, respectivamente, segundo e terceiro com maiores potenciais hidrelétricos.

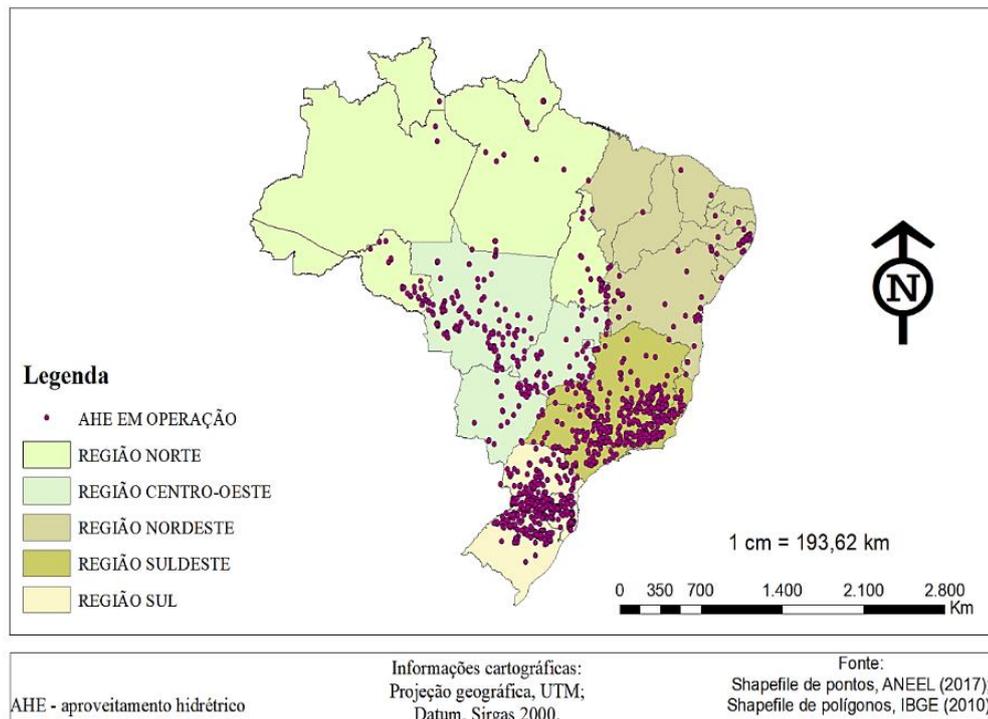
Figura 8 – Potencial hidrelétrico por estados do Brasil.



Fonte: Autor (2017).

A região Norte é a que tem a menor quantidade de unidades em operação (UHE, PCH e CGH) em relação às regiões Sul, Sudeste, Centro-oeste e Nordeste (Figura 9).

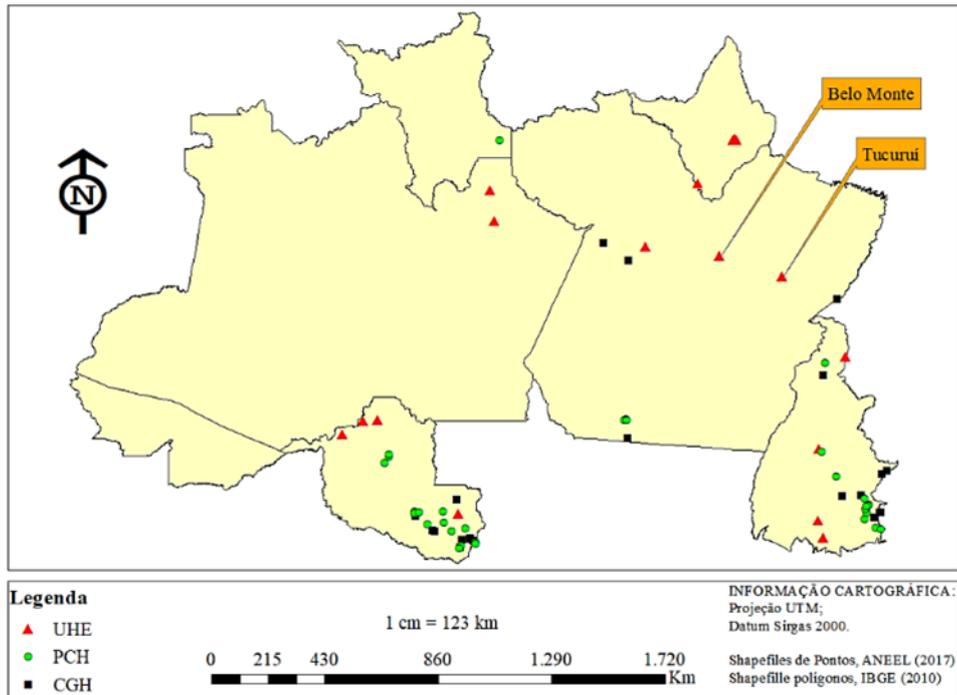
Figura 9 – Aproveitamento hidrelétrico brasileiro.



Fonte: Autor (2017).

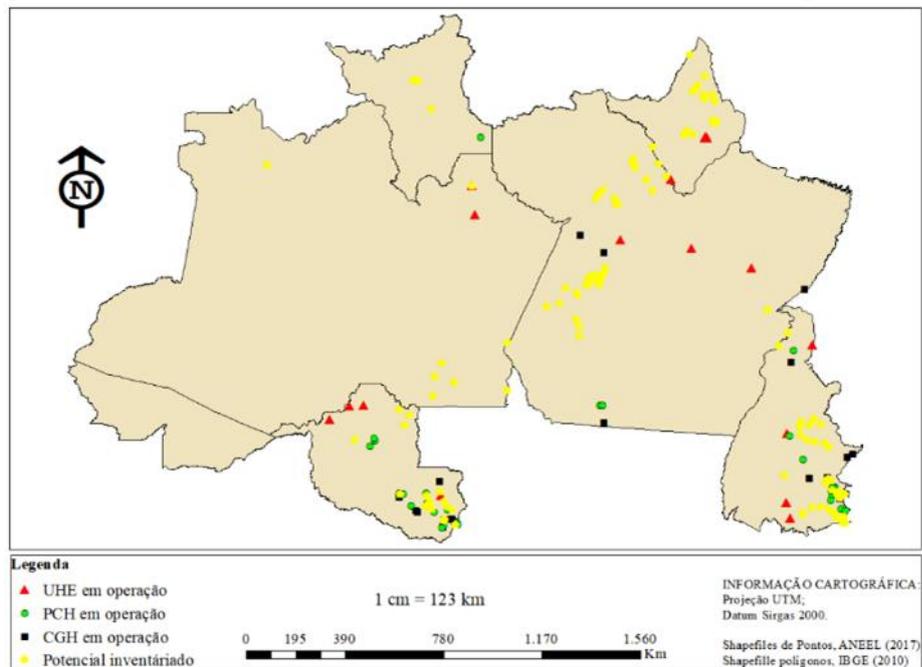
Contudo, dentro deste cenário, a região Norte apresenta o maior potencial hidrelétrico (100405 MW), com 17 UHEs, entre elas, Tucuruí e Belo Monte que são as duas maiores hidrelétricas genuinamente brasileiras e estão entre as dez maiores do mundo. Além de possuir 37 PCHs e 23 CGHs em operação, conforme apresentado na Figura 10. Entretanto, são explorados (31735,45 MW), ou seja, 31,6 % do que poderia ser utilizado. Segundo Ferreira, Fernandes e Gomes (2017), a baixa utilização do potencial hidrelétrico na região Norte é devido à predominância de planícies, à sua grande diversidade biológica e à distância dos principais centros consumidores de energia. Portanto, para a região explorar todo o seu potencial, estão previstas instalações de mais 53 UHEs, 87 PCHs e 26 CGHs. A Figura 11 apresenta os locais onde serão instaladas as novas unidades geradoras hidrelétricas.

Figura 10 - Potencial instalado na região Norte.



Fonte: Autor (2017).

Figura 11– Locais onde serão instaladas novas unidades geradoras.



Fonte: Autor (2017).

Além, do potencial inventariado, ainda há o potencial que não foi contabilizado. Pois, de acordo com os trabalhos de Holanda et al.(2017), é possível explorar o potencial à jusante de usinas hidrelétricas. Segundo Liu e Packey (2014), esse tipo de

tecnologia teria implicação especial para suprir a demanda de energia em países em rápido desenvolvimento e ricos em recursos hidrelétricos. Montoya Ramírez, Cuervo e Monsalve Rico (2016) fazem uma avaliação da viabilidade técnica e econômica para a implantação de turbinas comerciais à jusante de hidrelétricas na Colômbia, chegando à conclusão que ainda não é viável economicamente para este país.

2.6 ENERGIA HIDROKINÉTICA

A energia hidrocínética das correntes de água tem uma densidade de energia relativamente alta em relação à densidade do ar, com energia geralmente previsível despachada a uma rede, pois as correntes de água são predominantemente impulsionadas pela gravidade e não pelo estado momentâneo da atmosfera, como as correntes de ar (BIRJANDI et al., 2013). Esta peculiaridade possibilita um melhor dimensionamento de projetos que envolvam a instalação de turbinas hidrocínéticas. Pois, de acordo com Khan, Iqbal e Quaicoe (2008), a tecnologia que possibilita a conversão da energia cinética dos rios, está disponível e em desenvolvimento, e cada vez mais, os custos estão menores.

2.6.1 Princípios de Operação

De acordo com Kumar e Sarkar (2016), a potência de saída da turbina é afetada principalmente por três fatores, a saber: velocidade, área varrida pelo rotor da turbina e eficiência geral do sistema de conversão (Equação 19).

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 C_p \quad (19)$$

Em que P é a potência extraída da turbina (W); ρ é a massa específica da água (kg/m^3); A é a área varrida pelas pás do rotor (m^2); U é a velocidade da água (ms^{-1}); e C_p é o coeficiente de potência (coeficiente de Betz).

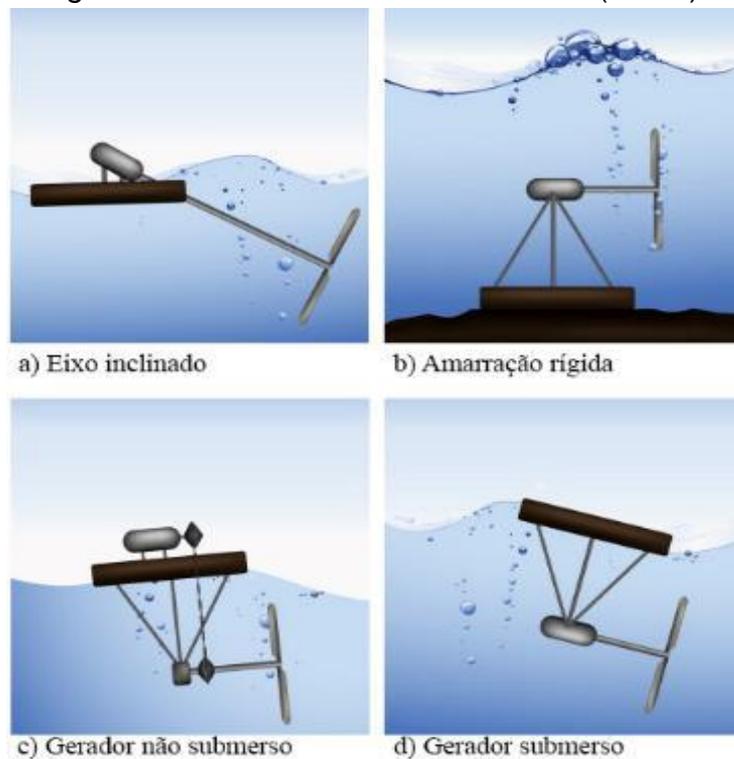
Segundo Kumar e Sarkar (2016), Yuce e Muratoglu (2015), Vermaak et al. (2014), a máxima eficiência que uma turbina ideal pode atingir é conhecida como limite de Betz. A lei de Betz propõe que o coeficiente de potência máximo teórico para uma turbina rotativa em fluxo de fluido seja de 0,593. Entretanto, de acordo com Vermaak et al. (2014), as pequenas turbinas em rios têm as suas próprias perdas, reduzindo o coeficiente de potência para 0,25. Sendo o limite máximo para as máquinas altamente eficientes com baixas perdas mecânicas. Geralmente as turbinas hidrocínéticas são modeladas para ter um rotor de velocidade fixa no qual o rotor gira com uma

velocidade de rotação constante. Porém, em sistemas para os quais se busca melhor eficiência, são utilizados mecanismos de velocidades variáveis (YUCE e MURATOGLU, 2015).

2.6.2 Turbinas Hidrocinéticas

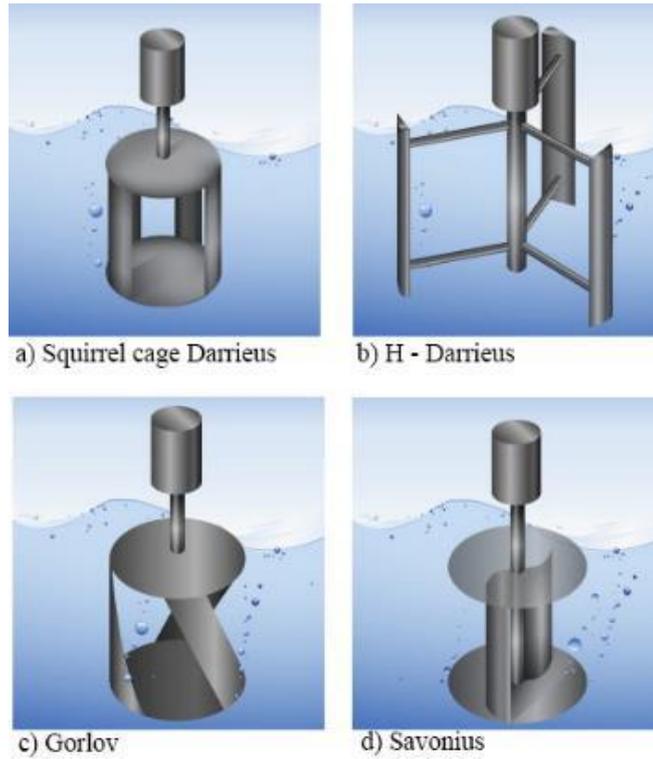
Existem duas categorias de turbinas hidrocinéticas, que são caracterizadas pelo posicionamento do eixo do rotor em relação ao fluxo da água, a saber: turbinas de eixos axial e vertical (BEHROUZI et al., 2016; KHAN et al., 2009). De acordo com Vermaak et al. (2014), as turbinas axiais de eixo inclinado foram estudadas principalmente como conversores de energia em pequenos rios. As Figuras 12 e 13 apresentam diversos tipos de turbinas de eixo horizontal (axial) e de eixo vertical, respectivamente.

Figura 12– Turbinas de eixo horizontal (axiais).



Fonte: Vermaak, Kusakana e Koko (2014).

Figura 13 – Turbinas de eixo horizontal (axiais).



Fonte: Vermaak et al. (2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

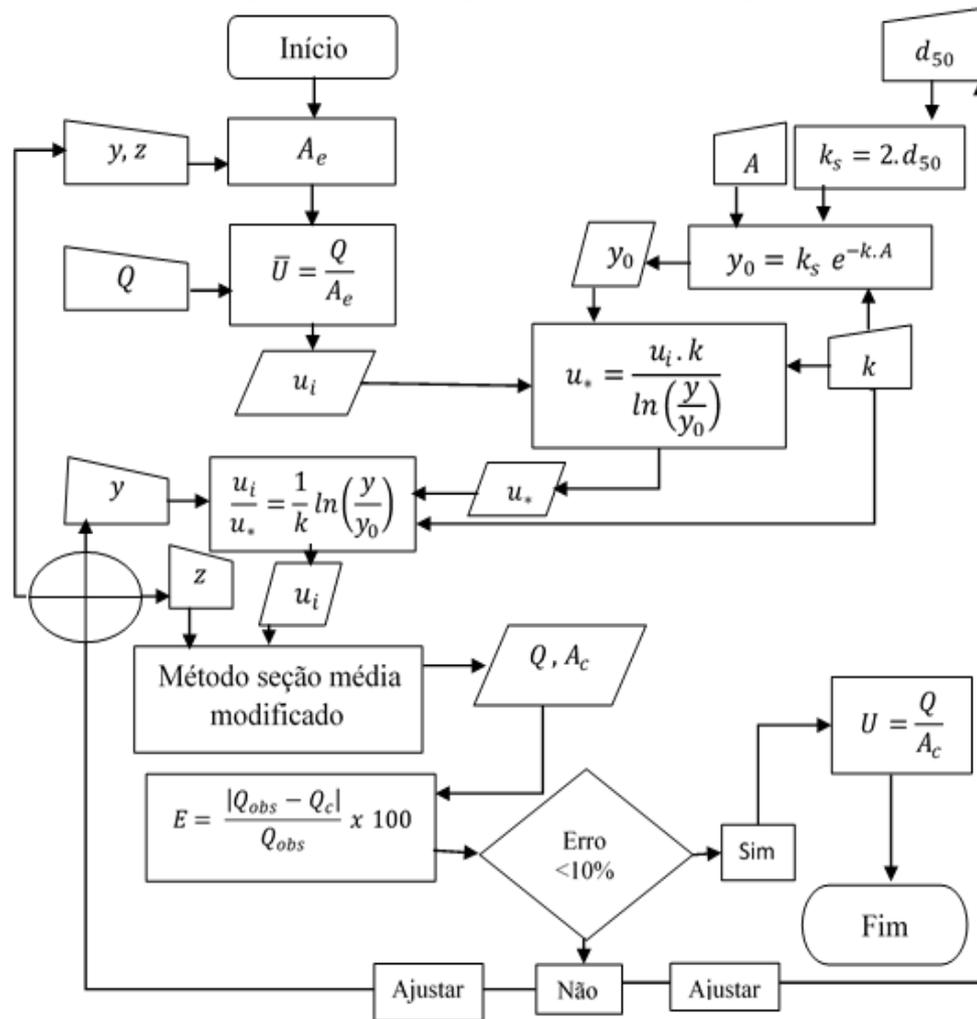
3.1 APRESENTAÇÃO DO MODELO

É um modelo matemático que tem como base a lei de distribuição logarítmica de velocidade de fluxo. Assim, fazendo uso da equação da continuidade, tendo a vazão como único dado de entrada, estimando a largura e a profundidade da lâmina d'água na seção transversal do rio, calcula-se a velocidade média. Este modelo traz como contribuição a distribuição da velocidade logarítmica por toda a seção do rio e têm como saída a velocidade média diária e a forma geométrica da seção.

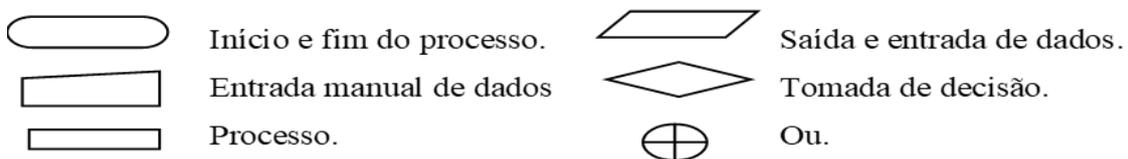
3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O trabalho teve como base a inversão do modelo de Maghrebi e Rahimpour (2005), em que a partir de um simples ponto de medida de velocidade é possível estimar a vazão em canais e rios. Entretanto, não foi possível fazer o caminho inverso deste modelo, por não dispor das variáveis necessárias à sua inversão e nem ser o interesse deste trabalho medir tais variáveis. Assim, desenvolveu-se um modelo que é possível calcular a velocidade média diária tendo como entrada observada o dado de vazão, conforme a sequência lógica apresentada na Figura 14.

Figura 14– Fluxograma de metodologia.



Legenda



Fonte: Autor (2017).

Estima-se aleatoriamente a área da seção transversal utilizando a largura (z) e a profundidade (y). Assim, com o uso da Equação da continuidade, tendo como variável conhecida a vazão, é encontrado o valor de velocidade média. De acordo com Maghrebi (2006), a velocidade média de um canal está aproximadamente a 60% de profundidade a partir da superfície da água. Usando a Equação 3, estima-se a altura limite (y_0) onde $u = 0$; com a Equação 2, considerando a velocidade média encontrada como uma velocidade medida a 60% de profundidade, calcula-se a velocidade de cisalhamento (u_*) usando a lei logarítmica, resolvida para esta variável (Equação 20).

$$u_* = \frac{u.k}{\ln\left(\frac{y}{y_0}\right)} \quad (20)$$

Fixando a variável y_0 e u_* e utilizando a lei logarítmica (Equação 2), calcula-se os perfis de velocidade por toda a seção transversal de acordo com a quantidade de vertical. Optou-se pelo uso da lei logarítmica para a distribuição de velocidade por ser uma equação de uso consolidado, haja vista, que a constante de Von Kármán (K) já foi definida experimentalmente (LEE et al., 2013). Além disso, foi utilizada em diversos estudos de vários autores, tais como: Babaeyan-Koopaei et al. (2002), Chen et al. (2016), entre outros.

3.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo consiste em simular a vazão, pelo método da Seção Média Modificada, fazendo uso dos perfis logarítmicos de velocidades e da área da seção estimada. Esta vazão simulada será comparada com a vazão observada.

3.3.1 Método da Seção Média Modificada

O método utilizado neste estudo divide o eixo horizontal da seção transversal em segmentos (z_i) de um metro, independente da largura da seção transversal. Esta divisão foi para facilitar os cálculos das subáreas da seção, pois, no método tradicional, a divisão dos segmentos depende da largura. Deste modo, utilizando a profundidade (y_i) estimada para cada segmento, calcula-se a subárea (a_i) da seção (Equação 21).

$$a_i = \frac{(y_{i+1} + y_i)(z_{i+1} - z_i)}{2} \quad (21)$$

Assim, fazendo uso das velocidades calculadas a $0,2y$ e $0,8y$ calcula-se a média entre elas, desta maneira, cada vertical terá uma velocidade média. Logo, a velocidade média que atua na subárea é encontrada com a Equação 22.

$$u_{a_i} = \frac{u_{y_i} + u_{y_{i+1}}}{2} \quad (22)$$

Sendo u_{a_i} a velocidade média na subárea, u_{y_i} e $u_{y_{i+1}}$ as velocidades médias nas verticais.

Em cada subárea também há uma sub-vazão ($q_i = a_i u_{a_i}$), que somadas, obtém-se a vazão simulada (Q_s) (Equação 23).

$$Q_s = \sum_i^n q \quad (23)$$

3.3.2 Ajuste do Modelo

Caso o erro relativo percentual (Equação 24), entre a vazão observada (Q_o) e a simulada (Q_s) seja maior que 10%, faz-se o ajuste em uma das seguintes variáveis:

- D_{50} , quando o erro não é muito elevado;
- Profundidade, o ajuste é feito nesta variável para erro percentual muito elevado;
- Largura, quando o erro é muito elevado e não há mais possibilidade de ajuste pela variável profundidade.

$$E = \frac{|Q_o - Q_s|}{Q_o} \times 100 \quad (24)$$

3.3.3 Cálculo da Velocidade Média

Quando o Erro Relativo Percentual entre a vazão observada e simulada for igual ou menor que 10 %, calcula-se a velocidade média utilizando a Equação 25.

$$\bar{U} = \frac{Q}{A} \quad (25)$$

3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

3.4.1 Parâmetros do Desempenho

Erro médio quadrático – RMSE (Equação 26): descreve a diferença entre a simulação de modelos e as observações nas unidades das variáveis (CONVERSA et al., 2015). Os ajustes perfeitos são indicados com os seus valores próximos de zero. Contudo, valores menores do que a metade do desvio padrão dos valores observados podem ser considerados baixos (MORIASI et al., 2007).

Erro médio quadrático relativo – RRMSE (Equação 27): representa a dispersão da variável analisada em torno da média, é utilizado para quantificar a precisão diante da variabilidade dos dados (CAMICI, BROCCA e MORAMARCO, 2017). Este parâmetro estatístico fornece uma medida em porcentagem da diferença relativa entre dados simulados e observados. Quando o resultado é menor que 10% da média, o mesmo é considerado excelente, bom se estiver entre 10 e 20% e ruim se os valores são maiores que 30% (JAMIESO, PORTER e WILSON, 1991);

Razão do desvio padrão de observação – RSR (Equação 28): incorpora os benefícios das estatísticas do índice de erros e inclui um fator de escala/normalização, de modo que a estatística resultante e os valores relatados possam ser aplicados a vários constituintes. RSR varia do valor ideal de 0, que indica zero RMSE ou variação residual, portanto, simulação do modelo perfeito, para um valor positivo grande quando for menor que a metade do desvio padrão (MORIASI et al., 2007). Quanto menor o RSR, menor o RMSE e melhor o desempenho da simulação do modelo. Portanto, valores de RSR entre: 0,0 e 0,5, são considerados muito bons; 0,5 e 0,6, bons; 0,6 e 0,7 satisfatórios; e maior que 0,7, ruins (MORIASI et al., 2007);

Porcentagem de viés – PBIAS (Equação 29): o valor ideal é 0,0, com valores de baixa magnitude indicando simulação precisa do modelo (CONVERSA et al., 2015). Os valores positivos apresentam subestimação do modelo e os negativos indicam viés de superestimação (GUPTA et al., 1999). Quando se compara modelos de vazões, valores de PBIAS: menores do que ± 10 , são considerados muito bons; entre ± 10 e ± 15 , bons; entre ± 15 e ± 25 , satisfatórios; e maior que ± 25 , ruins (MORIASI et al. 2007)

$$RMSE = \sqrt{\sum_i^n/n} \quad (26)$$

$$RRMSE = RMSE \times \frac{100}{Q_o} \quad (27)$$

$$RSR = RMSE / \sqrt{\sum_i^n(Q_s - \overline{Q_o})^2} \quad (28)$$

$$PBIAS = \sum_i^n(Q_o - Q_s) \times \frac{100}{\sum_i^n(Q_o)} \quad (29)$$

Sendo Q_s e Q_o valores de vazão simulados e observados, respectivamente, e $\overline{Q_o}$ o valor médio observado.

3.4.2 Validação

Por não dispor de dados mensurados para comparar as velocidades simuladas com as observadas, a validação do modelo foi realizada confrontando as vazões simuladas com as observadas. Pois, a vazão simulada é calculada a partir da distribuição de velocidade e pela área simulada, em vista disso, ela foi utilizada para validar o modelo usando os parâmetros de desempenho RMSE, RRMSE, RSR e PBIAS.

3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO.

Neste modelo a velocidade média calculada a partir da equação da continuidade foi considerada uma velocidade pontual medida no centro do canal livre a uma profundidade de 60% a partir da superfície; a rugosidade do leito foi considerada uniforme; devido à condição de não deslizamento, a velocidade ao longo do perímetro molhado é zero; a velocidade cisalhante foi considerada uniforme por toda a seção transversal.

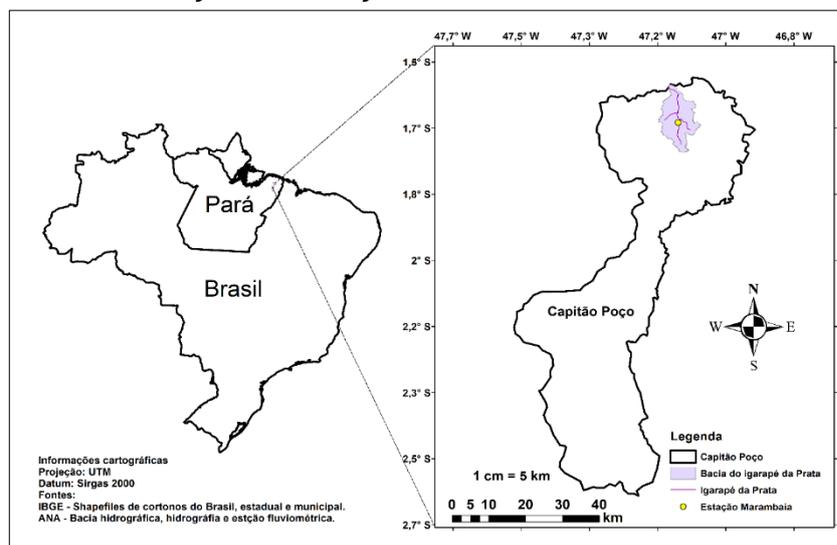
3.6 FORMA GEOMÉTRICA DE CANAL NATURAL

As formas geométricas foram determinadas a partir das verticais utilizadas para calcular o perfil de velocidades no método da seção média. Além disso, foram levadas em consideração duas formas geométricas prováveis para canais naturais (trapezoidal e meia elipse) e suas combinações. Estas formas geométricas foram usadas porque a água na passagem pelo canal natural arrasta o material do fundo e das margens formando talwegues.

3.7 BACIAS HIDROGRÁFICAS PARA APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo Vazão-Velocidade foi aplicado nas bacias hidrográficas dos rios Amazonas, São Francisco e Paraná. Porém, a princípio o método foi aplicado utilizando dados de vazão (Estação Fluviométrica Marambaia – 31600000) da pequena bacia hidrográfica do igarapé da Prata. Essa bacia é a menor do Pará com longas séries de dados de vazão (BLANCO et al., 2013). A bacia está localizada no município de Capitão Poço – Pará – Brasil (Figura 15).

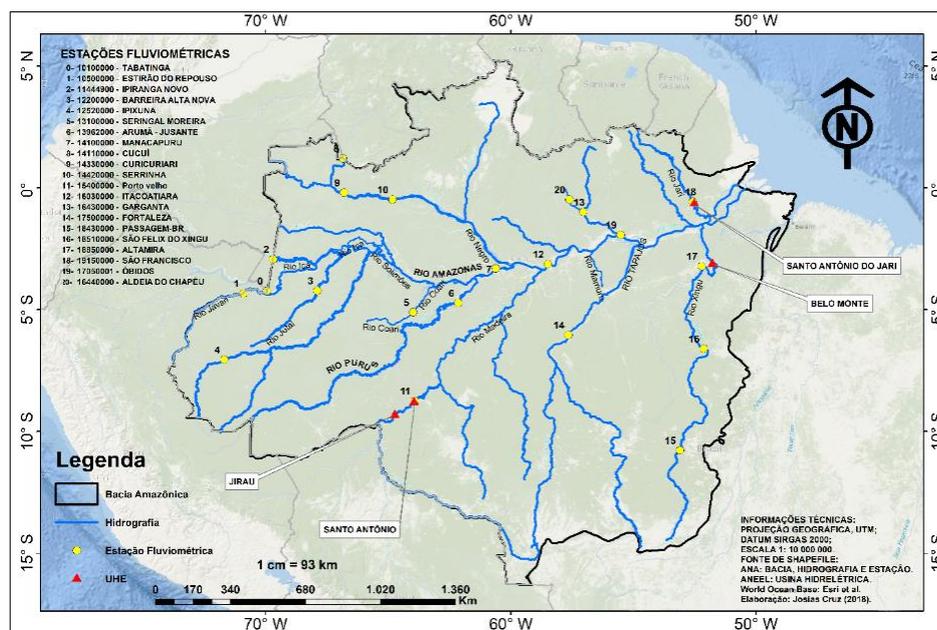
Figura 15 – Localização da estação fluviométrica Marambaia – 31600000.



Fonte: Autor (2017).

A bacia do rio Amazonas é conhecida como a maior bacia hidrográfica do mundo. Possui 6 milhões de km² de superfície e drena aproximadamente 15% da quantidade total de água doce despejada nos oceanos (PAIVA et al., 2013). Além disso, o rio Amazonas tem vários afluentes. A Figura 16 apresenta a localização das estações fluviométricas utilizadas para simular os perfis logarítmicos de velocidade no rio Amazonas e em alguns de seus afluentes.

Figura 16– Localização das estações fluviométricas utilizadas no modelo Vazão-velocidade.

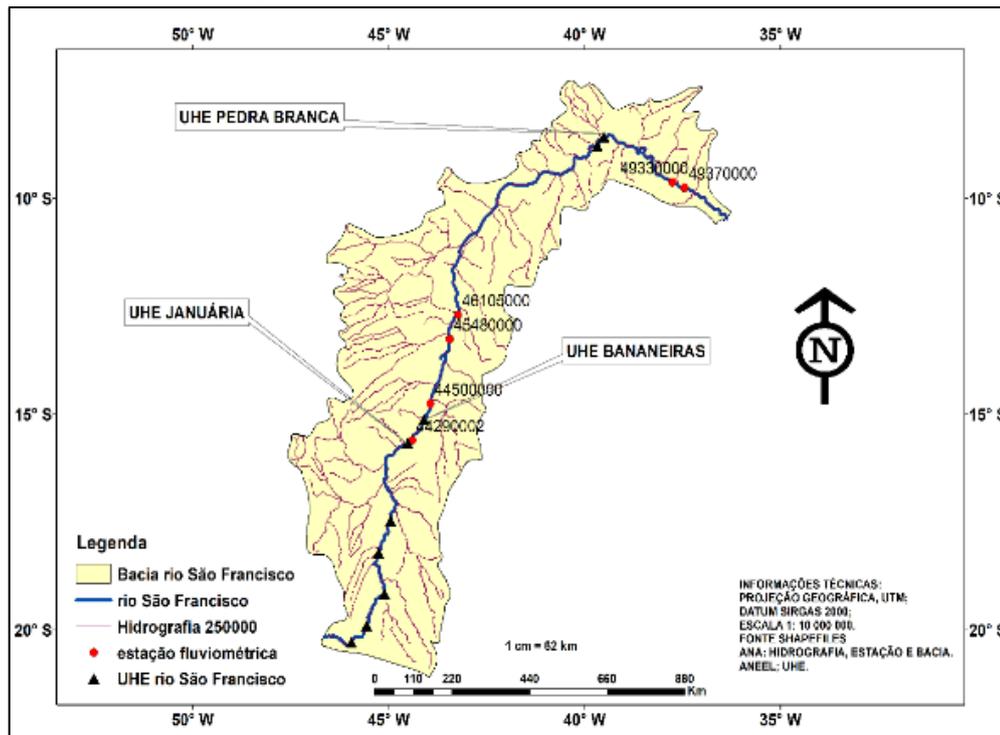


Fonte: Autor (2018).

A bacia do rio São Francisco é totalmente inserida no território brasileiro. Localizada no nordeste do país cobrindo cerca de 630 km². O rio flui de sul a norte ao longo de 2 860 km, abrangendo diversas regiões climáticas (MANETA et al., 2009).

A Figura 17 apresenta a bacia do rio São Francisco, as estações fluviométricas e as usinas hidrelétricas localizadas na bacia. A Estação fluviométrica 44290002 está à jusante da UHE Januária aproximadamente uns 16 km e a montante uns 61 km da UHE Bananeiras que está à montante da estação 44500000. A UHE Pedra Branca se localiza a 215 km da estação código ANA: 49330000.

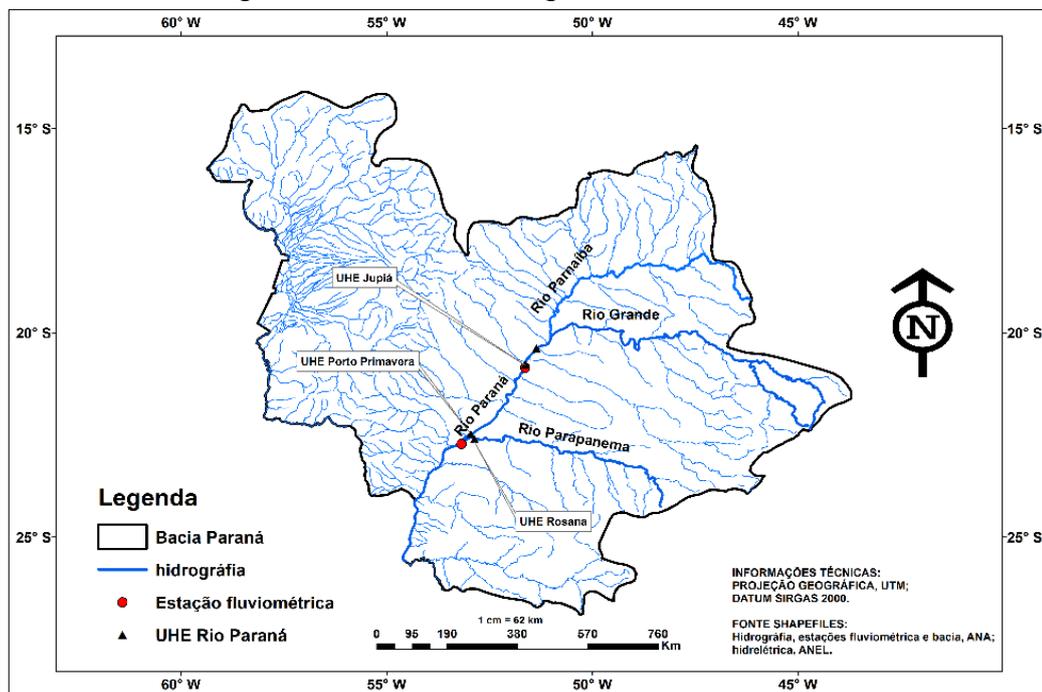
Figura 17 – Bacia do rio São Francisco.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 18 apresenta a bacia Hidrográfica do Paraná, as usinas hidrelétricas próximas as estações fluviométricas utilizadas para simular a velocidade média diária.

Figura 18 – Bacia hidrográfica do rio Paraná.



Fonte: Autor (2018).

A Bacia hidrográfica Paraná é a que tem o maior potencial hidroelétrico em operação no Brasil, deste modo, o rio Paraná é transformado em uma sucessão de lagos (STEVAUX; MARTINS e MEURER, 2009).

Nas bacias que existem usinas hidrelétricas (UHE), foi dada preferência aos dados das estações à jusante das barragens. Porém, nos casos em que não se teve acesso às séries históricas das estações fluviométricas localizadas nestes pontos, foram utilizadas as de montantes. Assim, utilizaram-se os dados de maior e menor vazão da série histórica.

3.9 ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROKINÉTICO

O potencial hidrocínético foi analisado para $C_p = 0,593$ (BETZ, 1926), pois, de acordo com Kumar e Sarkar (2016), este valor é a máxima eficiência que uma turbina ideal pode atingir e $C_p = 0,25$ é a eficiência que as pequenas turbinas em rios podem alcançar (VERMAAK et al., 2014). Deste modo, foram analisados dois cenários de potencial hidrocínético para as bacias estudadas. Um mais otimista e outro mais pessimista.

O diâmetro do rotor necessário, para calcular a área varrida, foi determinado em função da profundidade estimada para a menor vazão. Considerando a submersão da turbina em período de estiagem, para que a produção de energia seja durante os 365 dias do ano, foi levada em consideração a sugestão de Kolekar e Banerjee (2015), que recomendam a instalação de turbina, de modo que, o rotor fique a um raio de distância das superfícies sólidas do canal e meio raio para a superfície livre.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

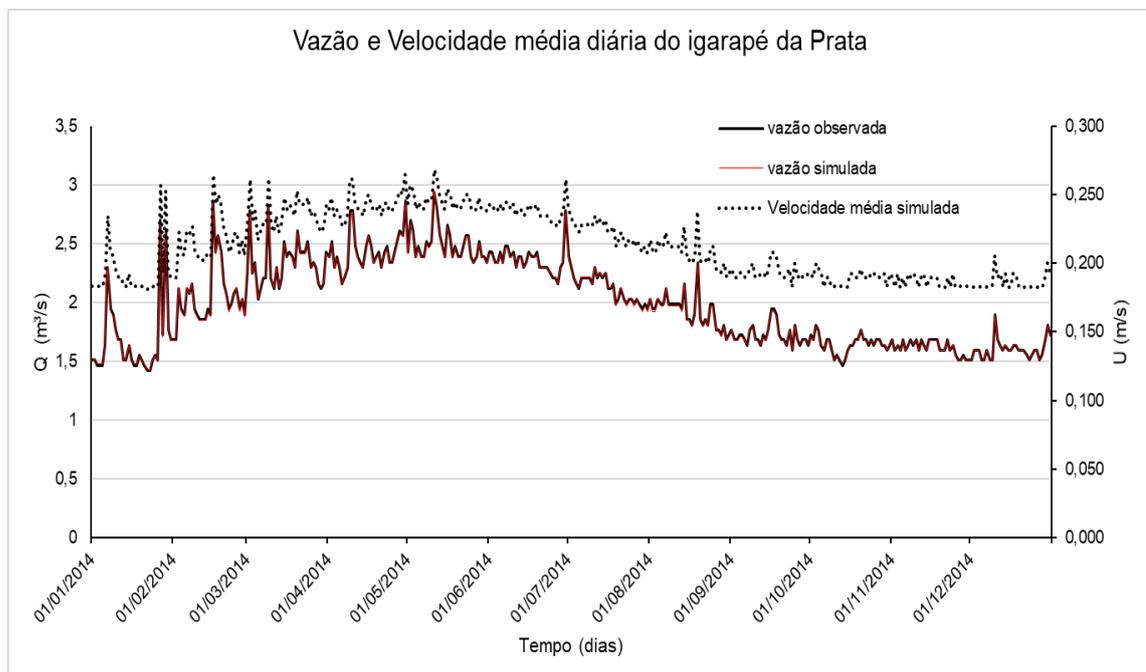
4.1 INTRODUÇÃO

Apesar de serem analisados diversos rios brasileiros, sempre que houve a possibilidade de se aplicar o modelo à jusante de UHEs, isso foi feito, a exemplo do trabalho de Holanda et al. (2017), o qual analisou o potencial hidrocínético do reservatório de jusante da UHE Tucuruí na bacia do Tocantins/Araguaia. Quando não se tinha os dados de jusante, foram utilizados os de montante.

4.2 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

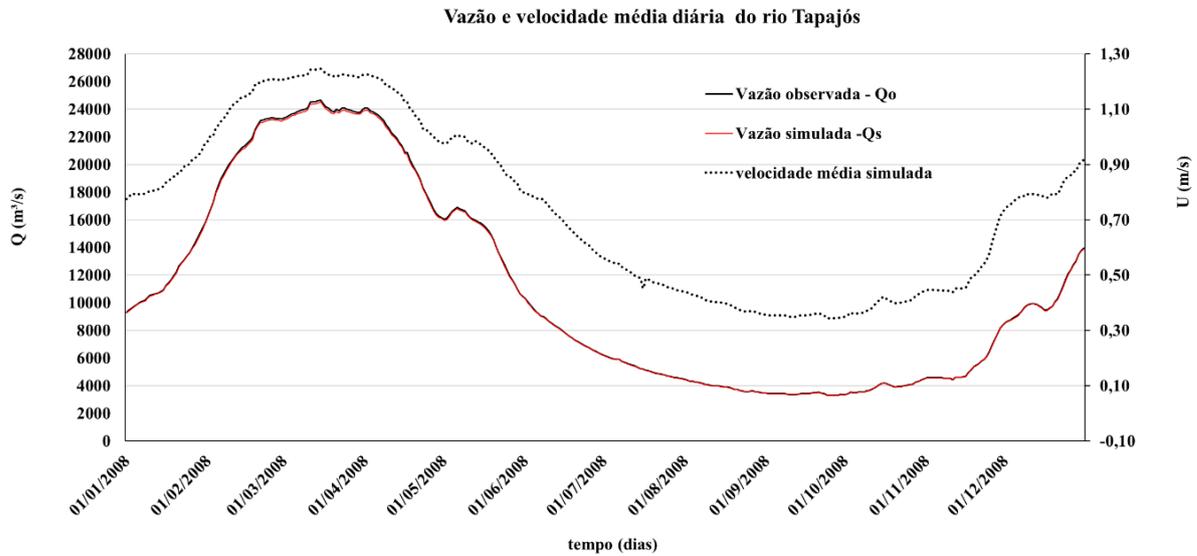
Os primeiros resultados do modelo foram para verificar o comportamento físico da velocidade em relação a vazão e para validar o modelo. Assim, conforme apresentado nas Figuras 19 e 20, foram simuladas as vazões diárias e as velocidades médias diárias no período de um ano tanto para uma pequena bacia hidrográfica como para uma grande.

Figura 19 - Velocidade simulada, vazão observada e simulada do igarapé da Prata.



Fonte: Autor (2018)

Figura 20 - Velocidade simulada, vazão observada e simulada do rio Tapajós.



Fonte: Autor (2018).

Como podem ser observadas nas Figuras 19 e 20, as velocidades médias diárias simuladas pelo modelo acompanham as variações de vazões tanto diariamente como mensalmente, demonstrando que o modelo, fisicamente, responde bem. Além disso, as figuras apresentam os ajustes quase que perfeito entre as vazões observadas e simuladas, o que é confirmado com os resultados dos parâmetros de desempenho do modelo (Tabela 1).

Tabela 1- Resultados dos parâmetros de desempenho aplicados ao modelo.

Código	Rio	RMSE	RRMSE	RSR	PBIAS
31600000	Igarapé da Prata	0,005	0,228	0,001	0,038
17500000	Tapajós	86,474	0,786	0,001	0,537

De acordo com os valores dos parâmetros de desempenho, o modelo Vazão-Velocidade se enquadra como muito bom, mesmo subestimando os valores de velocidade média diária e tendo o valor do RMSE elevado para a seção transversal do rio Tapajós. Porém, este valor está abaixo da metade do desvio padrão (3627,38), que segundo Moriasi et al. (2007), é um valor que pode ser considerado baixo.

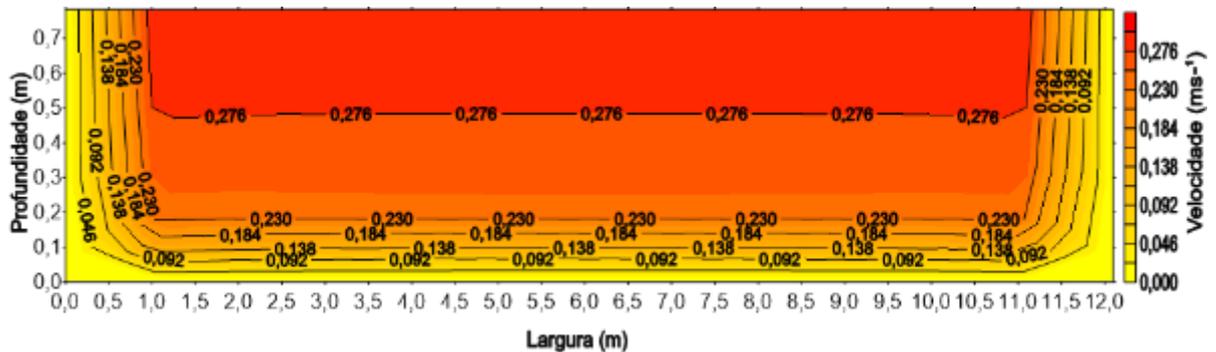
4.3 APLICAÇÃO DO MODELO NA BACIA HIDROGRÁFICA NO IGARAPÉ DA PRATA

4.3.1 Simulação de Velocidade com a Maior Vazão do Igarapé da Prata

A Figura 21 apresenta as isolinhas de velocidade da seção transversal do igarapé da Prata (Estação Fluviométrica Marambaia, código ANA – 31600000),

resultante do modelo Vazão-Velocidade, que teve como dado de entrada a maior vazão. Deste modo, é possível visualizar que as menores velocidades ocorrem perto das margens e do leito do rio, à medida que se distancia, a velocidade aumenta. Assim, para este tipo de seção geométrica, em que a largura é maior que a profundidade, as maiores velocidades estão no centro e próximas à superfície.

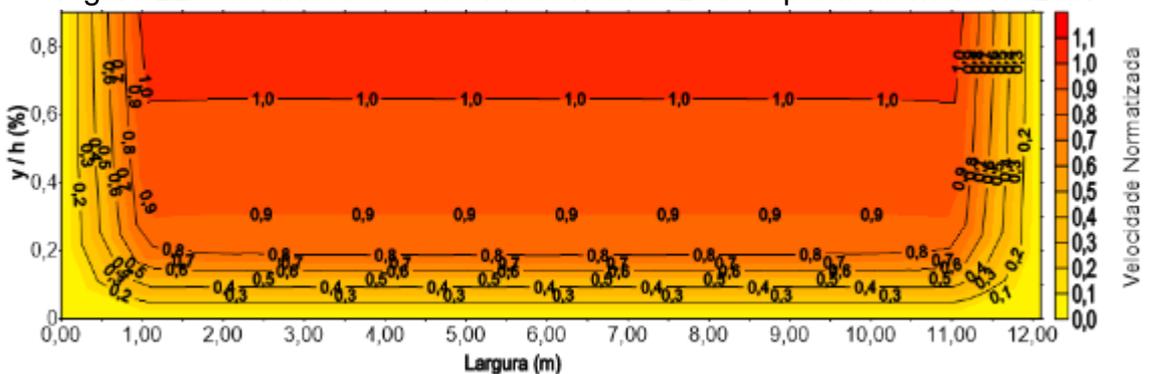
Figura 21 – Isolinhas de velocidade a partir do maior dado de vazão ($2,66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).



Fonte: Autor (2017).

Farina et al. (2017), Goring (1997) e Maghrebi e Rahimpour (2005), com modelos diferentes, encontraram comportamento semelhante de velocidade em rios e canais artificiais com aspecto geométrico equivalente ao estudado. A Figura 22 apresenta a isolinhas de velocidades normalizadas. Deste modo, é possível localizar a velocidade média, que de acordo com as literaturas estudadas, está aproximadamente a 60% de profundidade a partir da superfície. Portanto, a velocidade média normalizada é igual a 1.

Figura 22 – Isolinhas de velocidade normalizada a partir da maior vazão.



Fonte: Autor (2017).

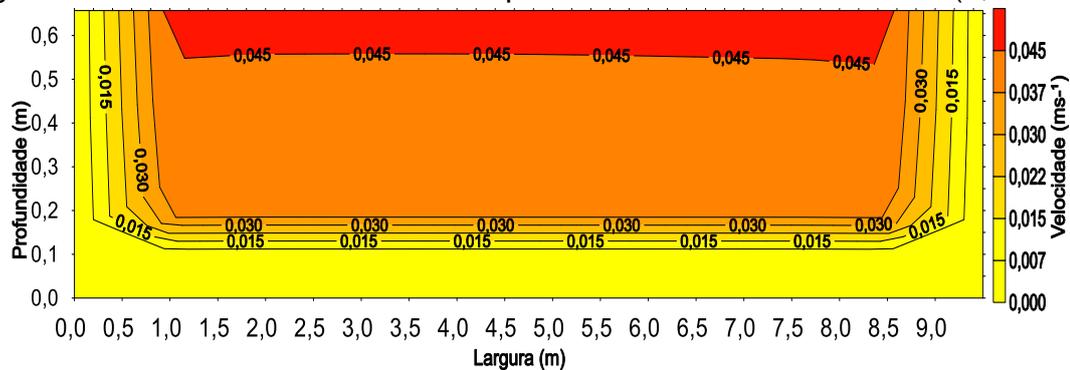
O valor de entrada ($2,66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) no modelo, que deu origem as isolinhas de velocidades apresentadas, é o de maior vazão ocorrida. Assim a vazão calculada

($2,453 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) apresentou um erro relativo percentual de 7,79 %. Deste modo, o valor de velocidade estimado ($0,259 \text{ ms}^{-1}$) resultou em um erro de 1,19% em relação ao valor de velocidade observado ($0,264 \text{ ms}^{-1}$).

4.3.2 Simulação de Velocidade com a Menor Vazão do igarapé da Prata

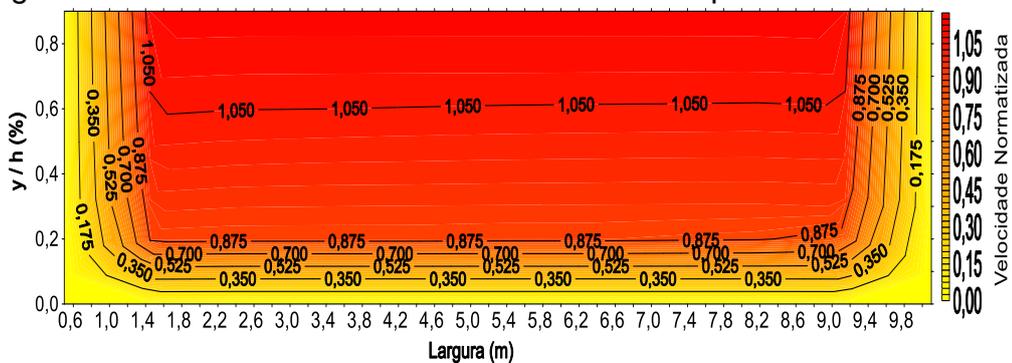
Nas Figuras 23 e 24 são apresentadas as isolinhas de velocidade a partir do menor dado de vazão. Apesar de serem provenientes de uma vazão menor, o comportamento é similar ao de maior vazão. Este fato é atribuído à rugosidade do leito do rio, que é o mesmo para os dois perfis de velocidades, e está condizente com as literaturas (KEULEGAN, 1938; MAGHREBI e AHMADI, 2017; PEKTAS, 2015; RAHIMPOUR e MAGHREBI, 2006) que afirmam: a velocidade dos rios e canais são influenciadas pelo material do leito.

Figura 23 – Isolinhas de velocidade a partir do menor dado de vazão ($0,29 \text{ ms}^{-1}$).



Fonte: Autor (2017).

Figura 24 – Isolinhas de velocidade normalizada a partir da menor vazão.



Fonte: Autor (2017).

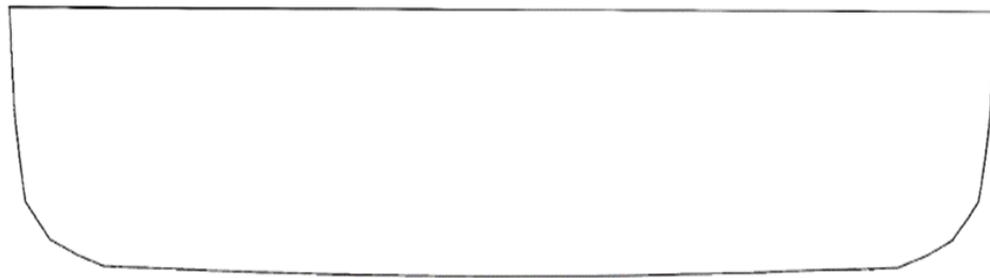
O erro relativo percentual (5,5%) apresentado entre a vazão observada ($0,29 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e a simulada ($0,274 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) para a menor vazão, confirmam que o modelo responde bem para ambas as vazões. Os erros ficaram abaixo de 10%, que de acordo

com outros estudos disponíveis na literatura (FAVRE et al., 2007; MAGHREBI e RAHIMPOUR, 2005), é um percentual que indica um bom ajuste para o modelo.

4.3.3 Forma Geométrica

A forma geométrica mais provável da seção transversal para o igarapé da Prata aproxima-se de uma meia elipse (Figura 24).

Figura 25 – Forma geométrica da seção transversal resultante do modelo.



Fonte: Autor (2017).

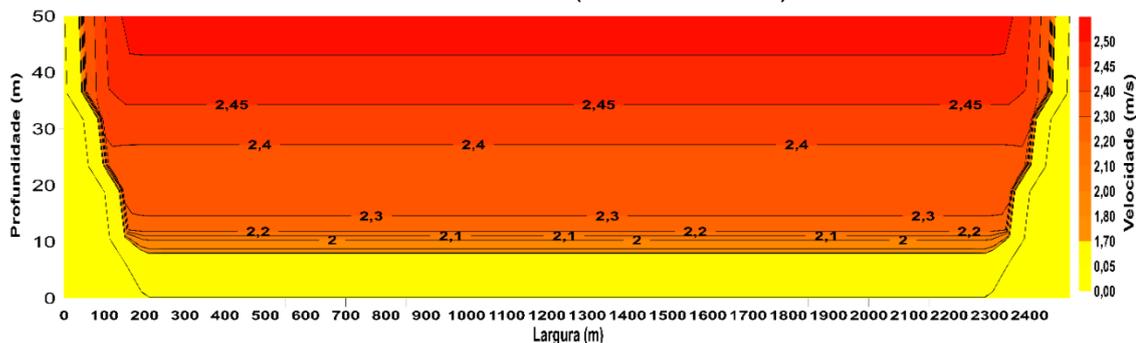
Para Chávarri et al. (2013), a geometria do canal é o primeiro parâmetro que controla a resposta do modelo hidrodinâmico 1-D ao fluxo de montante. Neste trabalho a geometria do canal é um parâmetro de entrada importante para determinar a velocidade média.

4.4 APLICAÇÃO DO MODELO NA BACIA AMAZÔNICA

4.4.1 Utilização do Modelo no Rio Amazonas

As isolinhas de velocidade da seção transversal do rio Amazonas (Figura 27), foram geradas a partir da maior vazão da série histórica da estação fluviométrica Óbidos (código: 17050001), localizada no município de Óbidos – Pará.

Figura 26 – Isolinhas de velocidade da seção transversal do rio Amazonas a partir da maior vazão ($291\,900\text{ m}^3\text{s}^{-1}$).



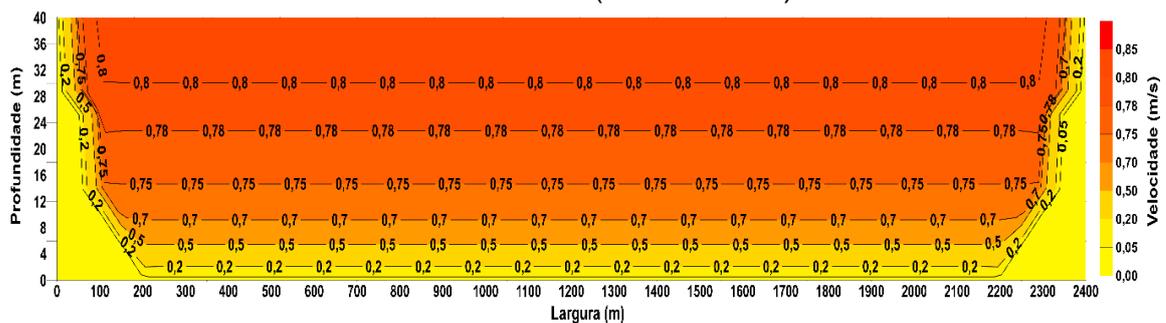
Fonte: Autor (2017).

O comportamento apresentado pela velocidade na maior bacia foi parecido ao da menor bacia. A velocidade é menor próxima do perímetro molhado, à medida que se distancia das margens e do leito, aumenta sua magnitude, este fato é devido à condição de contorno de a velocidade ser zero próxima do perímetro molhado. Embora, a vazão seja superior a maior vazão da menor bacia, ela não influencia no comportamento da velocidade de rios. Pois, este é influenciado pela forma geométrica e pela rugosidade do leito, conforme literatura estudada (MAGHRBY e AHMADI, 2017; RAHIMPOUR e MAGHREBY, 2006; PEKTAS, 2015).

A vazão calculada pelo modelo apresenta um erro de 5,9 % em relação à vazão observada. Este erro está dentro do percentual estipulado (10%) para estimar a velocidade média dentro de um erro aceitável. Nos dados utilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas) para gerar a equação da curva de descarga, para a mesma estação fluviométrica utilizada neste trabalho, a velocidade média calculada é de $2,16 \text{ ms}^{-1}$ para uma vazão de $266\,897 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Portanto, a velocidade média calculada ($2,329 \text{ ms}^{-1}$) é condizente com a seção transversal desta bacia e com a vazão usada para a sua estimativa.

A Figura 28 apresenta as isolinhas de velocidade para a menor vazão ($72\,480 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) do rio Amazonas. O perfil de velocidade apresenta o mesmo comportamento que o de maior vazão. O erro relativo percentual entre a vazão observada e calculada pelo modelo é de 4,86 %. Assim, a velocidade média resultante é de $0,753 \text{ ms}^{-1}$. De acordo com dados da ANA, a velocidade para uma vazão de $84\,350 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ é igual a $0,75 \text{ ms}^{-1}$.

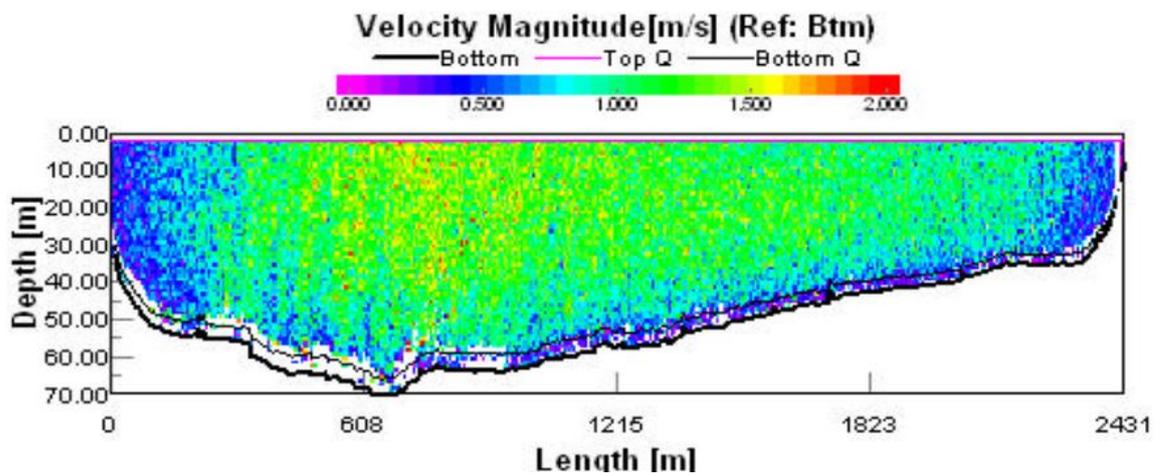
Figura 27 – Isolinhas de velocidade da seção transversal do rio Amazonas a partir da maior vazão ($72\,480 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).



Fonte: Autor (2017).

Comparando as Figuras 27 e 28, que são os perfis de velocidade logarítmicos saídos do modelo Vazão-Velocidade, com a Figura 29, que apresenta a seção transversal e o perfil de velocidade do rio Amazonas na estação fluviométrica de Óbidos medidos com um perfilador de corrente acústico Doppler (ADCP). É possível observar similaridades nas magnitudes de velocidade, que são menos intensas próximas às margens e do leito. Portanto, esta comparação assegura que a saída de isolinhas de velocidade produzida pelo modelo é uma representação satisfatória das magnitudes de velocidades reais.

Figura 28 – Medição de ADCP: seção transversal e distribuição de velocidade na seção Rio Amazonas em Óbidos, Brasil, 16/12/2003.



Fonte: Bourgoïn e Cardoso (2003).

A Tabela 2 apresenta os resultados da aplicação do modelo para as estações de Tabatinga, Itacoatiara e Manacapuru, que ficam localizadas no rio Amazonas. Ainda que, a seção transversal de Tabatinga apresente as menores vazões do que as de Itacoatiara, Manacapuru e Óbidos, ela apresenta maiores velocidades. Tal fato pode ser explicado em parte pela declividade, pois, esta estação está localizada em terreno onde a declividade é maior do que as outras estações. No estudo de Bjerklie (2007) a inclinação do canal e a os comprimentos dos meandros são usados para desenvolver uma equação para estimar a velocidade; os dados apresentados em seu trabalho mostram que a velocidade é diretamente proporcional à declividade.

Tabela 2 - Resultados da utilização do modelo Vazão-Velocidade no rio Amazonas.

Rio Amazonas								
Código estação	Nome estação	s	w	Vazão observada (m ³ /s)	Largura (m)	Profund. (m)	Vazão simulada (m ³ /s)	velocidade média (m/s)
10100000	Tabatinga	-4,2347	-69,9447	58915,17	1155	25	55204,78	2,034
				10065,14	790	16	9496,514	0,794
16030000	Itacoatiara	-3,1347	-58,4833	231950,8	3720	38	226465,4	1,639
				77811,24	3399	28,5	73990,71	0,801
14100000	Manacapuru	-3,3106	-60,6094	160629,9	3300	30	156449	1,621
				40797,91	3050	15	39683,3	0,891

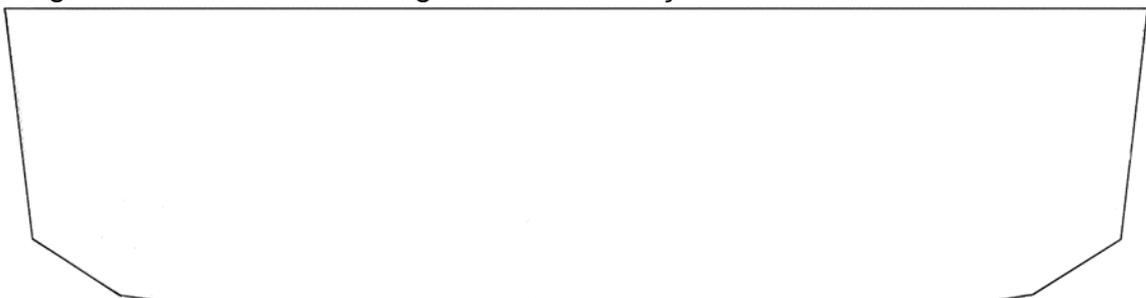
Fonte: Autor (2018).

Os valores de largura e profundidades estimados para as maiores vazões na estação Itacoatiara e Manacapuru estão dentro do intervalo encontrado por Trigg et al. (2009) em um levantamento batimétrico feito no rio Solimões logo após os picos de cheias. Nesse caso, os autores encontraram larguras de seções transversais entre 1620 m a 5624 m e profundidades dentro do intervalo de 20 m a 52 m ao longo do trecho estudado. Os valores de velocidades médias para a estação Itacoatiara, Manacapuru e Óbidos estão condizentes com os valores ($1,5 \text{ ms}^{-1}$, $1,4 \text{ ms}^{-1}$ e $1,7 \text{ ms}^{-1}$ respectivamente) encontrado por Filizola et al. (2015) para as mesmas estações.

4.3.2 Forma Geométrica para a Seção da Estação Fluviométrica Óbidos

De acordo com as profundidades estimadas pelo modelo, a forma geométrica mais provável para a seção transversal do rio Amazonas, na seção transversal da estação fluviométrica de Óbidos no trecho estudado, é a fusão de um trapézio com a metade de uma elipse, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 29 – Possível forma geométrica da seção transversal do rio Amazonas



Fonte: Autor (2017).

Confrontando a Figura 30 com a Figura 29, pode-se visualizar que a estimativa geométrica do modelo apresenta uma simplificação em relação ao perfil de velocidade feito pela ADCP, pois neste, a profundidade é menor na margem esquerda e o fundo é irregular, no entanto, a representação geométrica é usada para estimar a área da seção transversal, pois, ela é utilizada para calcular a vazão simulada. O teste de simplificar a geometria das seções transversais totalmente irregulares para retangulares feita por Trigg et al. (2009) apresentou resultados satisfatórios, demonstrando que ampla representação retangular é uma aproximação razoável no caso do modelo por ele estudado.

4.3.3 Afluentes do Rio Amazonas

A Tabela 3 Apresenta os resultados de velocidade médias para os principais afluentes do rio Amazonas e o Apêndice A apresenta as isolinhas velocidades de cada seção transversal de rio em que o modelo Vazão-Velocidade foi aplicado.

Tabela 3 - Resultados de velocidade dos afluentes do rio Amazonas.

Código estação	Estação	LAT.	LONG.	Rios	Largura (m)	Profundidade (m)	Vazão observada (m³/s)	Vazão simulada (m³/s)	velocidade média (m/s)
10500000	ESTIRÃO DO REPOUSO	-4,341	-70,906	RIO JAVARI	300	14,5	5462,9	4991,0	1,250
					200	3,5	190,0	179,6	0,270
11444900	IPIRANGA NOVO	-2,930	-69,693	RIO PUTOMAYO /IÇA	810	13	13776,0	13155,4	1,305
					650	4	720,0	707,0	0,277
12200000	BARREIRA ALTA NOVA	-4,221	-67,893	RIO JUNTAÍ	332	8,5	3144,8	2947,9	1,110
					290	2	212,9	207,7	0,366
12520000	IPIXUNA	-7,056	-71,689	RIO JURUÁ	243	10,5	3883,1	3516,3	1,514
					180	1	86,7	84,2	0,480
13100000	SERINGAL MOREIRA	-5,109	-63,985	RIO COARI	155,5	6,5	788,7	724,8	0,777
					80	1,5	28,3	27,1	0,234
13962000	ARUMÃ - JUSANTE	-4,729	-62,145	RIO PURUS	730	25	32795,8	29534,9	1,788
					650	15	2707,2	2536,4	0,277
14110000	CUCUÍ	1,215	-66,853	RIO NEGRO	740	12,5	12515,0	11930,9	1,350
					400	3,5	254,0	248,4	0,181
14330000	CURICURIARI	-0,201	-66,802	RIO NEGRO	1400	14	28873,8	28086,6	1,471
					850	3,5	1228,8	1195,6	0,222
14420000	SERRINHA	-0,482	-64,827	RIO NEGRO	2002	14	35001,5	34463,7	1,248
					1550	5	1993,7	1971,1	0,257
15340000	PALMEIRAL (SALTO JIRAU)	-9,512	-64,810	RIO MADEIRA	815	24	47840,0	43733,5	2,435
					755	10	3580,0	3413,9	0,473
16430000	GARGANTA	-0,998	-57,043	RIO TROMBETAS	330	7,5	7342,0	6786,5	2,954
					310	5	37,3	35,3	0,024
17500000	FORTALEZA	-6,045	-57,643	RIO TAPAJÓS	2500	9	26151,8	25950,8	1,162
					2380	4	2954,4	2933,9	0,308
18430000	PASSAGEM-BR	-10,777	-53,096	RIO XINGU	530	8,5	5005,0	4809,2	1,109
					460	3,7	557,0	536,8	0,326
18460000	BOA SORTE	-6,736	-51,995	RIO XINGU	785	12	13916,0	13333,5	1,474
					740	5	495,0	479,6	0,134
18510000	SÃO FELIX DO XINGU	-6,604	-52,128	RIO XINGU	1520	8	17604,0	17451,3	1,447
					1444	1,4	623,0	618,8	0,308
18850000	ALTAMIRA	-3,215	-52,212	RIO XINGU	1700	9	32330,0	31975,6	2,112
					1220	1,2	365,0	362,0	0,249
19150000	SÃO FRANCISCO	-0,568	-52,569	RIO JARI	485	8	5545,0	5222,0	1,424
					300	3	23,3	22,4	0,026

Fonte: Autor (2018).

Os rios Trombetas, Madeira e Xingu em suas respectivas seções transversais das estações fluviométricas Garganta, Palmeiral e Altamira apresentam velocidades médias maiores do que 2 ms^{-1} , quando o dado de entrada é a maior vazão. Os demais rios estudados apresentam velocidades médias dentro do intervalo de $1,109 \text{ ms}^{-1}$ a

1,788 ms^{-1} , exceto o rio Coari que apresentou a menor velocidade média devido à conformação geométrica ser menor do que as dos outros rios.

Outro fator que explica a variabilidade de velocidade na bacia Amazônica é a morfologia, pois, de acordo com Paiva et al. (2013), a bacia amazônica é composta por três unidades morfológicas: os Andes, com altas altitudes e encostas; os planaltos das Guianas e do Brasil, com encostas moderadas; e a planície amazônica com declives muito baixos. Porém, quando o dado de entrada é a menor vazão as velocidades médias não superam 0,5 ms^{-1} .

O resultado de maior velocidade apresentado pelo rio Trombetas é explicado pela sua localização na unidade morfológica do planalto das Guianas. Contudo, para a menor vazão ele apresenta menor velocidade entre os rios estudados. Esta peculiaridade é devida ao efeito de remanso ocasionado pela maré no rio Amazonas, conforme o descrito no trabalho de Kosuth et al. (2009), por conseguinte influencia os seus afluentes (MEADE et al., 1991), principalmente os mais próximos do oceano. De acordo com Holdefer e Severo (2015), o fenômeno pode ser imperceptível em condições de maior vazão, contudo, em baixa vazão é perceptível.

4. 4 ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO

4.4.1 Bacia do Igarapé da Prata

Para o igarapé da Prata, utilizando a velocidade de 0,267 ms^{-1} , C_p de 0,25 e uma turbina hidrocínética de 0,5 m de diâmetro, o potencial estimado é de 0,52 W. Caso, as turbinas utilizadas tenham máxima eficiência ($C_p = 0,593$), será de 1,22 W. Para a menor velocidade (0,045 ms^{-1}), o potencial hidrocínético, será 0,003 W ($C_p = 0,25$) e de 0,005 W ($C_p = 0,593$). Esse é um caso desinteressante para fins de produção hidrocínética, mas que foi útil para aplicação da metodologia em desenvolvimento. Assim, as aplicações foram direcionadas para as grandes bacias hidrográficas.

4.4.2 Bacia Hidrográfica do rio Amazonas

A velocidade e profundidade de rios é um parâmetro que possibilita o dimensionamento do diâmetro do rotor em um projeto de turbinas hidrocínética (PUNYS et al., 2015). A Tabela 4 apresenta inventário de potenciais hidrocínéticos utilizando turbinas com diâmetro estimados a partir da menor profundidade e coeficientes de potência de 0,593 e 0,25. A velocidade e profundidade de rios é um

parâmetro que possibilita o dimensionamento do diâmetro do rotor em um projeto de turbinas hidrocínética (PUNYS et al., 2015).

Tabela 4 - Potencial hidrocínético da bacia hidrográfica do rio Amazonas.

Código estação	Rio	prof. (m)	U (m/s)	Área varrida (m ²)	Diâmetro (m)	Cp = 0,25	Cp = 0,593
						P.hid. (kW)/Unid. Turb.	P.hid. (kW)/Unid. Turb.
17050001	AMAZONAS	50,0	2,329	397,41	22,5	627,6	1488,6
		40,0	0,753	397,41	22,5	21,2	50,3
10100000	AMAZONAS	25,0	2,034	65,01	9,1	68,4	162,2
		16,0	0,794	65,01	9,1	4,1	9,6
16030000	AMAZONAS	38,0	1,639	208,57	16,3	114,8	272,3
		28,5	0,801	208,57	16,3	13,4	31,8
14100000	AMAZONAS	30,0	1,621	56,72	8,5	30,2	71,6
		15,0	0,891	56,72	8,5	5,0	11,9
10500000	JAVARI	14,5	1,250	3,14	2	0,8	1,8
		3,5	0,270	3,14	2	0,0	0,0
11444900	IÇA	13,0	1,305	4,15	2,3	1,2	2,7
		4,0	0,277	4,15	2,3	0,0	0,0
12200000	JUNTAÍ	8,5	1,110	0,95	1,1	0,2	0,4
		2,0	0,366	0,95	1,1	0,0	0,0
12520000	JURUÁ	10,5	1,514	0,20	0,5	0,1	0,2
		1,0	0,480	0,20	0,5	0,0	0,0
13100000	COARI	6,5	0,777	1,33	1,3	0,1	0,2
		1,5	0,234	1,33	1,3	0,0	0,0
13962000	PURUS	25,0	1,788	56,72	8,5	40,5	96,1
		15,0	0,277	56,72	8,5	0,2	0,4
14110000	NEGRO	12,5	1,350	3,14	2	1,0	2,3
		3,5	0,181	3,14	2	0,0	0,0
14330000	NEGRO	14,0	1,471	3,14	2	1,2	3,0
		3,5	0,222	3,14	2	0,0	0,0
14420000	NEGRO	14,0	1,248	6,60	2,9	1,6	3,8
		5,0	0,257	6,60	2,9	0,0	0,0
15400000	MADEIRA	23,0	2,340	12,56	4	20,1	47,7
		7,0	0,574	12,56	4	0,3	0,7
16430000	TROMBETAS	7,5	2,954	6,60	2,9	21,3	50,5
		5,0	0,024	6,60	2,9	0,0	0,0
16440000	CACHORRO	9,3	1,394	6,60	2,9	2,2	5,3
		5,0	0,073	6,60	2,9	0,0	0,0
17500000	TAPAJÓS	9,0	1,162	11,34	3,8	2,2	5,3
		4,0	0,308	11,34	3,8	0,0	0,1
18430000	XINGU	8,5	1,109	3,14	2	0,5	1,3
		3,7	0,326	3,14	2	0,0	0,0
18460000	XINGU	12,0	1,474	6,15	2,8	2,5	5,8
		5,0	0,134	6,15	2,8	0,0	0,0
18510000	XINGU	8,0	1,447	0,50	0,8	0,2	0,5
		1,4	0,308	0,50	0,8	0,0	0,0
18850000	XINGU	9,0	2,112	0,38	0,7	0,5	1,1
		1,2	0,249	0,38	0,7	0,0	0,0
19150000	JARI	8,0	1,424	2,27	1,7	0,8	1,9
		3,0	0,026	2,27	1,7	0,0	0,0

Fonte: Autor (2018).

Nos dois cenários de eficiência de turbinas, em todas as seções estudadas, o rio Amazonas tem o maior potencial hidrocínético tanto para a maior vazão como para

a menor vazão, isso se dá em função das velocidades e profundidades serem maiores, possibilitando a instalação de turbinas com maiores diâmetros. No entanto, a instalação de turbinas no rio Amazonas deve respeitar os usos múltiplos da água, principalmente, a navegabilidade do rio, que é a principal via de tráfego de pessoas e transporte de mercadorias da região.

Filizola et al. (2015) realizaram uma análise preliminar de potencial hidrocínético na bacia amazônica, classificando os pontos estudados em Itacoatiara e Óbidos como bons-excelentes, com potencial para geração de energia próximo de um ano, e em Manacapuru foi classificado como bom por poder gerar energia 50% do ano.

Os rios Negro, Trombetas, Cachorro, Javari, Iça, Juruá, Coari e Tapajós para as maiores velocidades apresentaram potencial hidrocínético que pode ser explorado durante o período chuvoso da região, porém, na estiagem a potência hidrocínética é inferior a 1kW. Contudo, são casos que não se pode descartar, principalmente o Trombetas, que para maior vazão pode gerar 50,457 kW para um diâmetro de 2,9 m e para uma turbina com 4,2 m de diâmetro a potência será de 105,843 kW. Com esta potência sendo convertida em energia elétrica e disponibilizado para as comunidades ribeirinhas é possível diminuir os impactos ambientais causados pelo uso de combustível fóssil. Além de contribuir para o desenvolvimento econômico das comunidades locais. O projeto de turbina hidrocínética do rio Maracá é um exemplo do uso desta tecnologia em prol de comunidades isoladas da Amazônia. A potência gerada pela turbina hidrocínética de 1 kW foi utilizada para atender a demanda produtiva de uma comunidade extrativista de castanha (SÁNCHEZ, TORRES e KALID, 2015).

No rio Tapajós e Jari estão previstas a instalação de três usinas hidrelétrica em cada rio. Sendo que no rio Jari já existe uma usina hidrelétrica. As estações fluviométricas 17500000 e 19150000 (Códigos ANA), utilizadas para aplicar o modelo, ficarão à jusante das usinas hidrelétrica de Chacorão e Açaipe B, na devida ordem. Depois de construídas as barragens, a dinâmica de fluxo do rio será toda alterada. Assim, as velocidades atuais encontradas para os rios Tapajós e Jari poderão ter suas magnitudes minimizadas e, conseqüentemente, o potencial hidrocínético.

A estação fluviométrica Porto Velho (código: 15400000), localizada à jusante da usina hidrelétrica Santo Antônio, no rio Madeira apresenta potência teórica de 47,716 kW, para a maior vazão, utilizando uma turbina com 4 m de diâmetro e C_p igual a 0,593 e para o período de estiagem, usando a mesma configuração de turbina a potência é de 0,704 kW. Para uma turbina com C_p igual a 0,25, a potência foi de 20,116 kW e 0,297 kW para o período de cheia e estiagem, respectivamente. Como a potência no período de estiagem é inferior a 1kW. O potencial hidrocínético pode ser utilizado no período de cheia, sendo que o diâmetro pode ser aumentado de 4m para 13 m, conseqüentemente, a potência passaria de 47,716 kW para 503,998 kW, no melhor cenário. A título de comparação, em um sistema composto por uma turbina Francis de 50 kW de potência, e por uma mini rede de distribuição de aproximadamente 2 km, o projeto de micro hidrelétrica na Cachoeira de Aruã, fornece eletricidade a 50 residências e para alguns usos produtivos (SÁNCHEZ, TORRES e KALID, 2015). Portanto, o potencial remanescente desta Hidrelétrica poderia atender uma demanda dez vezes maior do que a micro usina hidrelétrica.

As seções transversais do rio Xingu apresentam potencial hidrocínético para a maior vazão, porém, para a menor vazão não apresentaram bom potencial hidrocínético. A estação fluviométrica Altamira (código: 18850000), a mais próxima (155 km à montante) da hidrelétrica de Belo Monte, apresentou potência teórica, utilizando uma turbina com diâmetro de 0,7 m e C_p igual 0,593, de 1,074 kW para a maior vazão e 0,002 kW para a menor vazão para o caso de aproveitamento hidrocínético durante o ano todo.

No caso de aproveitamento somente no período de cheia o diâmetro pode ser aumentado para 5 m, assim a potência passará para 54,817 kW para $C_p = 0,593$. Este potencial foi avaliado à montante, mas, em trabalhos futuros, utilizando o modelo Vazão-Velocidade, este potencial poderá ser avaliado à jusante do reservatório da UHE de Belo Monte.

Segundo Ismail, Batalha e Lino (2015), 1,6 kW é o suficiente para o consumo, em média, de sete residências brasileiras. Portanto, o potencial hidrocínético estimado pode dar as comunidades isoladas da Amazônia acesso à energia elétrica. De acordo com Ismail, Batalha e Lino (2015), a implementação de sistemas descentralizado de energia é uma boa alternativa econômica e ambiental, que pode substituir os geradores de energia a diesel, que são bastantes utilizados por comunidades isoladas

da Amazônia. Outra alternativa para o uso desta tecnologia, é integrar à rede de transmissão. Caso a implementação seja feita por particulares, há a opção de vender a energia produzidas às concessionárias de energia.

4.5 REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

4.5.1 Utilização do Modelo na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco

A Tabela 5 apresenta as vazões observadas e as velocidades médias simuladas com os dados de algumas estações do rio São Francisco. Em um rio que não tem influência antropogênica, a vazão aumenta de montante para a jusante até sua foz (CARVALHO, 2008). Porém, isso não ocorre com o rio São Francisco, pois, há bastante aproveitamento hidrelétrico, no qual as vazões são reguladas pelos reservatórios. As diversas barragens em cascata construídas ao longo do tempo provocaram grandes modificações da pulsação natural e nas vazões interanuais do médio-baixo e baixo rio São Francisco (MEDEIROS et al., 2007). De acordo com Mendes et al. (2015), os reservatórios estão sujeitos às restrições, incluindo a manutenção de um fluxo mínimo de navegação e conservação ambiental.

Tabela 5 - Resultados da Aplicação do modelo Vazão-velocidade em algumas estações do rio São Francisco.

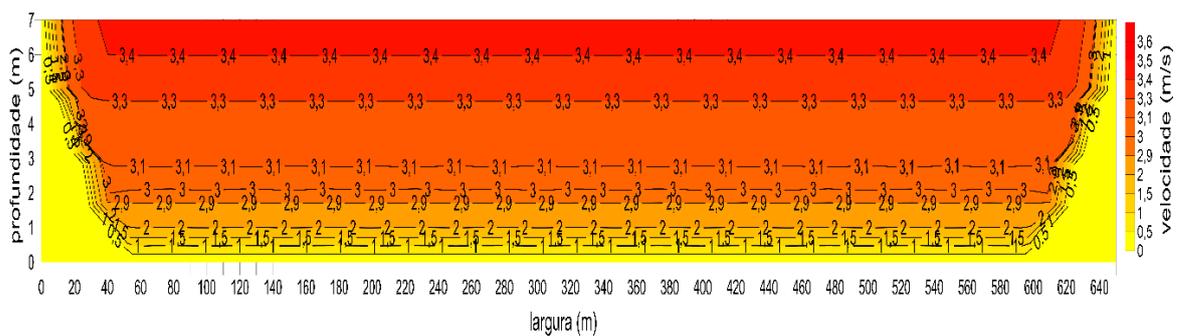
COD-ESTACÇÃO	ESTACÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE	LARGURA	PROFUNDIDADE	Vazão observada (m³/s)	Vazão simulada (m³/s)	velocidade média (m/s)
44290002	PEDRAS DE MARIA DA CRUZ	-15,6011	-44,3966	650	7	14094,00	13302,47	3,087
				300	2	262,92	256,504	0,437
44500000	MANGA	-14,75722	-51,635	700	9	11792,15	10952,88	1,864
				500	4	231,50	223,182	0,116
45480000	BOM JESUS DA LAPA	-13,2569	-43,4392	820	8	11193,81	10605,7	1,7
				320	2	260,96	248,943	0,407
46105000	PARATINGA	-12,696	-43,22638	700	10	13841,32	12746,86	1,967
				500	2	350,19	6344,964	0,35
49330000	PIRANHAS	-9,62611	-37,7561	410	13	10327,00	9296,026	1,926
				235	10	528,62	480,849	0,224
49370000	PÃO DE AÇÚCAR	-9,7514	-37,4464	760	12	15397,05	14025,82	1,679
				600	2,5	652,84	642,026	0,434

Fonte: Autor (2018).

As Figuras 30 e 31 apresentam o perfil logarítmico de velocidade do rio São Francisco na seção transversal da estação Pedras de Maria da Cruz (código: 44290002), que fica à jusante da UHE Januária. As velocidade de fluxo dependem das características físicas dos rios, e esta por sua vez, apresentam peculiaridades

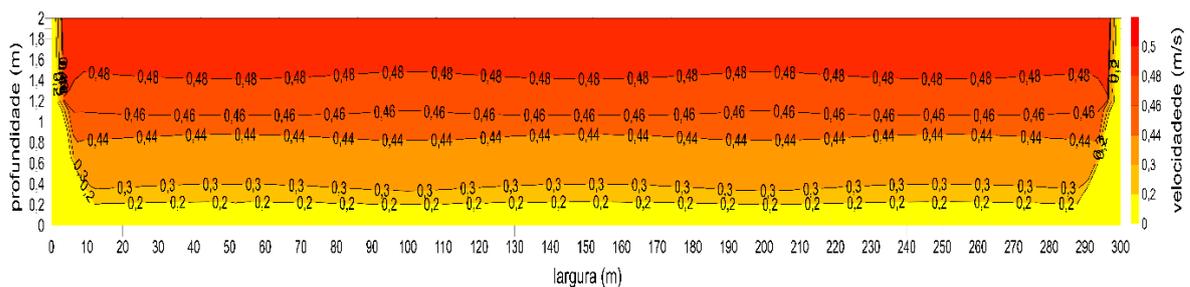
inerentes à sua localização (vide Apêndice B). Para o rio São Francisco, o diâmetro médio do material do leito ficou entre 0,01 m e 0,02 m, configurando-o como um rio de cascalho (MOHAJERI et al., 2016), deste modo, o atrito da água com o leito ocasionariam menores velocidades. Então, seria natural que a velocidade desse rio fosse menor do que as dos rios da bacia Amazônica, contudo, são maiores devido a declividade ser maior. Portanto, segundo Powell (2014) as variáveis físicas e os parâmetros influenciam o perfil de velocidade.

Figura 30 – Isolinhas de velocidade da seção transversal da estação 44290002 para maior vazão



Fonte: Autor (2018).

Figura 31 – Isolinhas de velocidade da seção transversal da estação 44290002 para menor vazão



Fonte: Autor (2018).

Nos perfis de velocidades são encontradas velocidade máxima de $3,6 \text{ ms}^{-1}$ e $0,5 \text{ ms}^{-1}$ para a maior e menor vazão, na devida ordem, próximas à superfície, o que concorda com Rahimpour (2017). que a velocidade máxima está próxima à superfície.

5.5.2 Estimativa de potencial na Bacia do Rio São Francisco

A Tabela 6 apresenta os valores de potência hidrocínética estimada para algumas seções do rio São Francisco utilizando o coeficiente de potência de turbina de 0,593 e 0,25.

A partir de uma perspectiva de geração de energia durante o período de estiagem, não há potencial durante o ano todo em nenhum dos cenários. Porém, se a avaliação for para o período de cheia do rio, todas as seções transversais apresentam potencial hidrocínético.

A seção transversal da estação fluviométrica (código: 44290002) está à jusante da UHE Januária apresenta potência de 8,285 kW para uma turbina com 1,1 m de diâmetro e $C_p = 0,593$. Caso a configuração de turbina seja com um diâmetro de 4 m, já que, no período de cheia a profundidade do rio permite um diâmetro de turbina maior, a potência passaria para 109,553 kW para o máximo coeficiente de potência, já no pior cenário ($C_p = 0,25$), a potência seria de 46,186 kW.

Tabela 6 - Potência hidrocínética das seções transversais do rio São Francisco.

Código estação	Rio	prof. (m)	U (m/s)	Área varrida (m ²)	Diâmetro (m)	Cp = 0,25	Cp = 0,593
						P.hid. (kW)/Unid. Turb.	P.hid. (kW)/Unid. Turb.
44290002	S	7,0	3,087	0,95	1,1	3,5	8,3
	Ã	2,0	0,437	0,95	1,1	0,0	0,0
44500000	O	9,0	1,864	3,80	2,2	3,1	7,3
		4,0	0,116	3,80	2,2	0,0	0,0
45480000	F	8,0	1,700	0,95	1,1	0,6	1,4
	R	2,0	0,407	0,95	1,1	0,0	0,0
46105000	A	10,0	1,967	0,95	1,1	0,9	2,1
	N	2,0	0,350	0,95	1,1	0,0	0,0
49330000	C	13,0	1,926	25,50	5,7	22,8	54,0
	I	10,0	0,224	25,50	5,7	0,0	0,1
49370000	S	12,0	1,679	1,54	1,4	0,9	2,2
	C	2,5	0,434	1,54	1,4	0,0	0,0

Fonte: Autor (2018).

A estação fluviométrica 49330000, que fica à jusante da UHE Pedra Branca, com uma turbina hidrocínética de diâmetro de 5,7 m, gera potência de 54,027 kW. Essa potência pode ser maior, pois, pode ser utilizada uma turbina com diâmetro maior.

O potencial avaliado à jusante das UHEs do rio São Francisco, não se pode dizer que é potencial remanescente, pois, o rio recebe contribuições de afluentes que aumentam a vazão no período de cheia. Contudo, no período de estiagem, pode ser que não existam fluxo de água nestes contribuintes, já que a maioria dos rios da região são intermitentes. Neste sentido, a avaliação difere do estudo de Holanda et al. (2017), que avaliaram o potencial remanescente à jusante da UHE de Tucuruí no rio Tocantins

na bacia hidrográfica Tocantins/Araguaia. Entretanto, são potenciais que não podem ser desprezados, pois podem ser usados para o desenvolvimento econômico do país e para diminuição do uso de combustíveis fósseis.

4.6 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANÁ

4.6.1 Utilização do Modelo na Bacia Hidrográfica do rio Paraná

A Tabela 7 apresenta os resultados de velocidade simuladas para a maior e menor vazão no rio Paraná para as estações UHE Jupuíá jusante e Porto José jusante.

Tabela 7- Resultado de velocidades média diária simulada para a bacia Paraná.

COD-ESTACÃO	ESTACÃO	Lat.	Long.	largura (m)	Prof. (m)	Vazão observada (m³/s)	Vazão simulada (m³/s)	velocidade média (m/s)
63010000	UHEJUPIÁ JUSANTE	-20,8553	-51,635	945	17	26342,5	25311,2	1,64
				848	4,4	1695,0	1679,1	0,45
64575003	PORTO JOSÉ- JUSANTE	-22,7175	-53,18	1190	15	26987,5	24423,3	1,50
				1137	6	4062,3	3948,8	0,59

Fonte: Autor (2018)

De acordo com os resumos de descargas (SISTEMA DE INFOMAÇÃO HIDROWEB) da estação fluviométrica 63010000, para vazões (26916 m³/s e 1732 m³/s), próximas das utilizadas no modelo, as velocidades médias são iguais a 1,633 ms-1 e 0,458 ms-1 respectivamente. Portanto, estes valores de vazões estão próximos dos valores de entrada no modelo, assim, as velocidades simuladas estão condizentes com os valores de velocidades medidos na estação.

Na estação UHE Jupuíá a velocidade é maior para a maior vazão, devido a área da seção transversal ser menor, porém, para a menor vazão a sua velocidade é menor do que a seção transversal da estação Porto José Jusante (64575003). O que pode ser explicado, já que no período de estiagem, a hidrelétricas estão armazenando água e vazão é regulada. Assim, a estação Porto José Jusante, que fica à jusante das UHEs Porto Primavera e Rosana tem maior vazão, pois recebe o fluxo de água das duas, diferente da estação UHE Jupuíá que recebe somente a vazão de uma UHE.

4.6.2 Estimativa de potencial hidrocínético na Bacia do Rio Paraná

A Tabela 8 apresenta os valores da estimativa de potência hidrocínética para as duas seções transversais do rio Paraná.

Tabela 8 - Potência hidrocínética instalada das seções transversais do rio Paraná utilizadas no modelo.

Código estação	Rio	prof. (m)	U (m/s)	Área varrida (m ²)	Diâmetro (m)	Cp = 0,25	Cp = 0,593
						P.hid. (kW)/Unid . Turb.	P.hid. (kW)/Unid . Turb.
63010000	RIO	17,0	1,637	4,91	2,5	6,4	6,4
	PARANÁ	4,4	0,454	4,91	2,5	0,1	0,1
64575003	RIO	15,0	1,504	9,07	3,4	9,2	9,2
	PARANÁ	6,0	0,594	9,07	3,4	0,6	0,6

Fonte: Autor (2018).

Os dois pontos avaliados na bacia do rio Paraná apresentaram potencial hidrocínético, somente para as maiores vazões, tanto para o melhor cenário de eficiência de turbina como para o pior.

Na seção transversal da estação fluviométrica UHE Jupia (63010000), que fica à jusante da hidrelétrica de mesmo nome, a potência remanescente é de 6,381 kW e de 2,69 kW para o pior e melhor cenário, respectivamente. Já na seção transversal à jusante das duas UHEs a potência ficou para o melhor cenário igual a 9,154 kW e para o pior cenário igual 3,859 kW.

Avaliando o potencial somente para o período de maiores vazões, o diâmetro da turbina na seção transversal (63010000) pode ser de 9,6 m, para um Cp = 0,593, a potência passa para 94,1 kW e para Cp = 0,25 a potência é de 39,67 kW. Já na seção (64575002) com um diâmetro de 8,4 m a potência é de 55,9 kW e 23,55 kW, para o melhor e pior cenário, respectivamente.

No estudo de Bittencourt et al. (2016), na bacia do rio Tietê, que uma sub bacia da bacia hidrográfica Paraná, avaliaram possíveis pontos para instalação de turbinas hidrocínéticas à jusante das Usinas Hidrelétrica Bariri e Ibitinga. Chegaram à conclusão de que os pontos onde ocorre as maiores velocidades são os melhores para a geração de energia.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados dos parâmetros de desempenhos utilizados para a validação, o modelo proposto consegue simular as velocidades médias diárias de maneira satisfatória. Porém, depende do conhecimento do usuário sobre a área de aplicação para simular de maneira rápida e eficiente. Já que, as variáveis largura, profundidade e d_{50} são estimados de forma aleatória.

As velocidades médias diárias, nos rios da bacia Amazônica, estão dentro do intervalo de $0,02 \text{ ms}^{-1}$ a $2,95 \text{ ms}^{-1}$. Embora os rios tenham grandes vazões, a relação largura/profundidade são muitas elevadas o que contribuem para velocidades baixas. Além disso, a maioria dos rios estão em região de planícies. Outros sofrem influencias de maré, principalmente, os que estão próximos a foz do rio Amazonas, fato que faz as velocidades de alguns contribuintes serem baixas no período de estiagem, as chamadas zonas de remanso.

Na bacia do rio São Francisco, as vazões são menores, porém, a velocidades são maiores. Sendo a sua relação largura/profundidade menor do que as do rio Amazonas. As intervenções antropogênicas regulam as vazões do rio, alterando a sua dinâmica de fluxo.

As formas geométricas que saem do modelo são aproximações simplificadas das seções transversais. Pois, as modificações nas margens e no leito do rio não permite exatidão nem nas medições com equipamentos quanto mais nas simulações. Contudo, o uso da forma geométrica simplificada traz grande contribuição para o estudo dos rios, principalmente, onde não existem dados batimétricos.

O rio Amazonas tem potencial hidrocínético para a geração de energia durante o ano todo. No entanto, a maioria de seus afluentes tem potencial somente no período de cheia, assim como, o rio São Francisco. Na bacia do rio Paraná há potencial remanescente à jusante das usinas hidrelétricas de Jupia, Porto Primavera e Rosana, mas, só para o período de cheia.

As principais limitações do trabalho são: não levar em consideração o transbordamento da calha do rio no período de cheia; as simulações de velocidades não são feitas no eixo longitudinal; o C_p utilizado na avaliação só leva em considera o a máxima e a mínima eficiência da turbina. Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se, de forma geral, a redução dessas limitações de forma mais pontual, para

avaliação de potenciais hidrocinéticos em rios, deve-se considerar coeficientes de potencias mais realistas, em função de projetos de turbinas hidrocinéticas, que considerem, por exemplo o fenômeno de cavitação e de emprego de difusores, buscando aumentar o próprio C_p .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA, Agência Nacional de Água. Sistema de Informações Hidrológicas-HidroWeb. Disponível: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Acessado em: 10 de dezembro de 2017.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Boletim de Informações Gerenciais. [s. l.], p. 73, 2017.
- BABAEYAN-KOOPAEI, K. et al. Velocity and turbulence measurements for two overbank flow events in River Severn. **Journal of Hydraulic Engineering-Asce**, [s. l.], v. 128, n. 10, p. 891–900, 2002.
- Betz, A. (1926). Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Germany: Ökobuch Verlag.
- BEHROUZI, Fatemeh et al. Renewable energy potential in Malaysia: Hydrokinetic river/marine technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 62, p. 1270–1281, 2016.
- BIRJANDI, Amir Hossein et al. Power measurement of hydrokinetic turbines with free-surface and blockage effect. **Ocean Engineering**, [s. l.], v. 69, p. 9–17, 2013.
- BITTENCOURT, Marcio de Pinho; NUNES, Maurício A. Avaliação de potencial hidrocínético remanescente a jusante de uhes na bacia hidrográfica do rio tietê. **Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, [s. l.], p. 16, 2016.
- BJERKLIE, David M. Estimating the bankfull velocity and discharge for rivers using remotely sensed river morphology information. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 341, n. 3–4, p. 144–155, 2007.
- BLANCO, C. J. C. et al. Contribution to hydrological modelling of small Amazonian catchments: application of rainfall–runoff models to simulate flow duration curves. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 58, n. 7, p. 1423–1433, 2013.
- BONAKDARI, Hossein. Establishment of relationship between mean and maximum velocities in narrow sewers. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 113, p. 474–480, 2012.
- BOURGOIN, Laurence Maurice; CARDOSO, Antônio. Hidrologia e Geoquímica da Bacia Amazônica. [s. l.], v. 2003, p. 1–28, 2003.
- CAMICI, S.; BROCCA, L.; MORAMARCO, T. Accuracy versus variability of climate projections for flood assessment in central Italy. **Climatic Change**, [s. l.], v. 141, n. 2, p. 273–286, 2017.
- CARVALHO, Thiago Morato De. Técnicas De Medição De Vazão Por Meios Convencionais E Technical of Discharge Measurement Through Conventional and Non Conventional Means. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 1, p. 73–85, 2008.
- CHÁVARRI, Eduardo et al. Hydrodynamic modelling of the Amazon River: Factors of uncertainty. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 44, p. 94–103, 2013.

CHEN, By Cheng-lung. Unified theory on power laws for flow resistance. [s. l.], v. 117, n. 3, p. 371–389, 1991.

CHEN, Zhigao et al. Estimating the flow velocity and discharge of ADCP unmeasured area in tidal reach. **Flow Measurement and Instrumentation**, [s. l.], v. 52, n. September, p. 208–218, 2016.

CONVERSA, Giulia et al. A decision support system (GesCoN) for managing fertigation in vegetable crops. Part II—model calibration and validation under different environmental growing conditions on field grown tomato. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 6, n. July, p. 1–14, 2015.

D. N. MORIASI et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

DE PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias et al. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 1226–1243, 2013.

ELETROBRÁS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Estado (valores em MW) Dezembro de 2016**. 2016. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx>>. Acesso em: 5 set. 2017.

ELS, Rudi Henri Van; JUNIOR, Antonio Cesar Pinho Brasil. The Brazilian Experience with Hydrokinetic Turbines. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 75, p. 259–264, 2015.

FARINA, G. et al. Estimating discharge in drainage channels through measurements of surface velocity alone: A case study. **Flow Measurement and Instrumentation**, [s. l.], v. 54, n. December 2016, p. 205–209, 2017.

FAVRE, ANNE; BLANCO, CLAUDIO; SECRETAN, YVES. Análise, Aplicação e Transposição de um Modelo Chuva-Vazão para Simulação de Curvas de Permanência de Pequenas Bacias da Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 205–216, 2007.

FERREIRA, D. M.; FERNANDES, C. V. S.; GOMES, J. Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 22, 2017.

FILIZOLA, Naziano et al. Preliminary analysis of potential for river hydrokinetic energy technologies in the Amazon Basin. [s. l.], p. 100, 2015.

GORING, Derek G. et al. Modelling the distribution of velocity in a river cross-section. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 155–162, 1997.

GUPTA, HOSHIN VIJAI; SOROOSHIAN, SOROOSH E YAPO, Patrice Ogou. 4.8 Generalized inverse Gaussian distribution. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], 1999.

HOLANDA, Patrícia da Silva et al. Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 101, p. 1203–1214, 2017.

HOLDEFER, Antonio Eliseu. Análise por ondaletas sobre níveis de rios submetidos à influência de maré. [s. l.], v. 20, p. 192–201, 2015.

ISMAIL, Kamal A. R.; BATALHA, Tiago P.; LINO, Fatima A. M. Hydrokinetic turbines for electricity generation in isolated areas in the Brazilian Amazon. [s. l.], v. 869, n. 8, p. 127–135, 2015.

JAMIESO, P.D.; PORTER, J.R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT 1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 27, p. 337–350, 1991.

KEULEGAN, Garbis H. Laws of turbulent flow in open channels. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, [s. l.], v. 21, p. 707, 1938.

KHAN, M. J. et al. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. **Applied Energy**, [s. l.], v. 86, n. 10, p. 1823–1835, 2009.

KHAN, M. J.; IQBAL, M. T.; QUACOUE, J. E. River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 2177–2193, 2008.

KOLEKAR, Nitin; BANERJEE, Arindam. Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. **Applied Energy**, [s. l.], v. 148, p. 121–133, 2015.

KOSUTH, Pascal et al. Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. [s. l.], v. 3150, n. September, p. 3141–3150, 2009.

KUMAR, Dinesh; SARKAR, Shibayan. A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 58, p. 796–813, 2016.

LAWS, Nicholas D.; EPPS, Brenden P. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 57, p. 1245–1259, 2016.

LEE, Hae-eun et al. Power Law Exponents for Vertical Velocity Distributions in Natural Rivers. **Journal of Engineering**, [s. l.], v. 2013, n. December, p. 933–942, 2013.

LIMERINOS, J. T. Determination of the Manning Coefficient From Measured Bed Roughness in Natural Channels. **USGS Water-Supply Paper 1898-B**, [s. l.], n. 1898B, p. 53, 1970.

LIU, Yue; PACKEY, Daniel J. Combined-cycle hydropower systems - The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 66, p. 228–231, 2014.

LOPES, João José Albernaz et al. An Approach for the Dynamic Behavior of Hydrokinetic Turbines. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 75, p. 271–276, 2015.

MAGHREBI, Mahmoud F. Application of the single point measurement in discharge estimation. **Advances in Water Resources**, [s. l.], v. 29, n. 10, p. 1504–1514, 2006.

MAGHREBI, Mahmoud F.; AHMADI, Arash. Stage-discharge prediction in natural rivers using an innovative approach. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 545, p. 172–181,

2017.

MAGHREBI, Mahmoud F.; RAHIMPOUR, Majid. A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open channels. **Flow Measurement and Instrumentation**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 347–352, 2005.

MANETA, M. P. et al. Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 96, n. 8, p. 1191–1200, 2009.

MEADE, Robert H. et al. BackWater Effects in the Amazon River of Basin. **Environmental Geology and Water Sciences**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 105–114, 1991.

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. a; JÚNIOR, R. C.Santos. Aporte Fluvial E Dispersão De Matéria Particulada Em Suspensão Na Zona Costeira Do Rio São Francisco (Se / Al). **Geochimica**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 212–231, 2007.

MENDES, Ludmilson Abritta et al. Trade-Off Analysis among Multiple Water Uses in a Hydropower System: Case of São Francisco River Basin, Brazil. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [s. l.], v. 141, n. 10, p. 4015014, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional. [s. l.], 2017.

MOHAJERI, Seyed Hossein et al. On the structure of turbulent gravel bed flow: Implications for sediment transport. **Advances in Water Resources**, [s. l.], v. 92, p. 90–104, 2016.

MONTOYA RAMÍREZ, Rubén D.; CUERVO, Felipe Isaza; MONSALVE RICO, César Antonio. Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: A case study. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 99, p. 136–147, 2016.

PEKTAS, Ali Osman. Computational modeling with sensitivity analysis: case study velocity distribution of natural rivers. **Neural Computing and Applications**, [s. l.], v. 26, n. 7, p. 1653–1667, 2015.

PETRIE, John et al. Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 69, p. 393–401, 2014.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Livro - Hidráulica Básica - Rodrigo Porto - 4ª Edição.pdf**, 2006.

POWELL, D.Mark. Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 136, p. 301–338, 2014.

PUNYS, P. et al. Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 50, p. 643–652, 2015.

RAHIMPOUR, Majid. Dimensionless isovelocity contours in rectangular cross sections by harmonic mean distances. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 241–245, 2017.

RAHIMPOUR, Majid; MAGHREBI, Mahmoud F. Prediction of stage-discharge curves in open-channels using a fixed-point velocity measurement. **Flow Measurement and Instrumentation**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 276–281, 2006.

SÁNCHEZ, A. S.; TORRES, E. A.; KALID, R. A. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 49, p. 278–290, 2015.

SIVAPRAGASAM, Chandrasekaran; MUTTIL, Nitin. Discharge rating curve extension - A new approach. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 505–520, 2005.

STEVANUX, José C.; MARTINS, Débora P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. **Geomorphology**, [s. l.], v. 113, n. 3–4, p. 230–238, 2009.

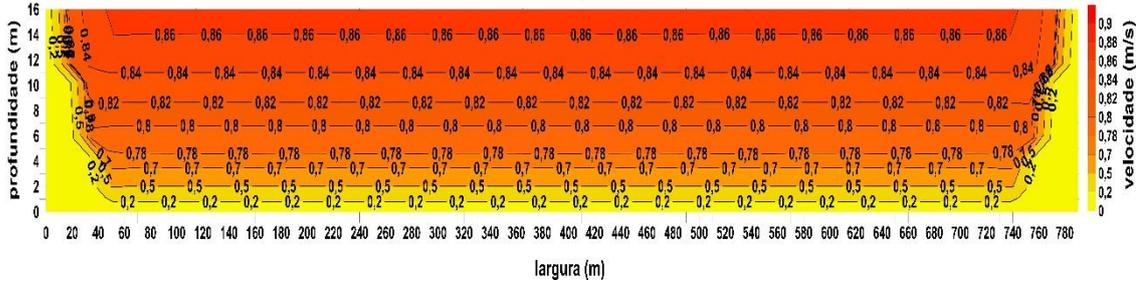
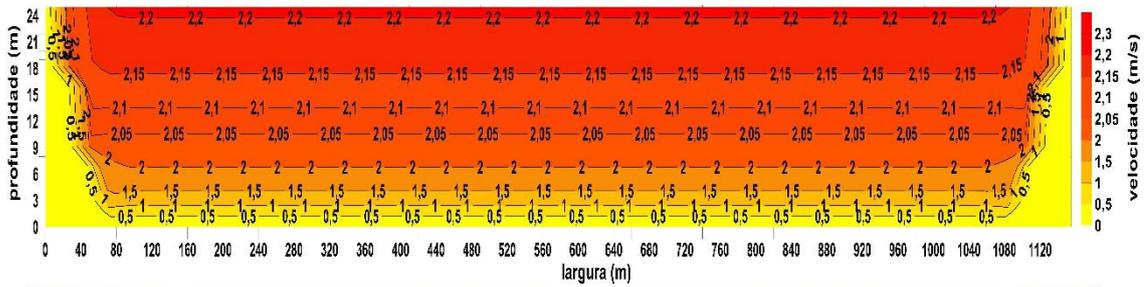
TRIGG, Mark A. et al. Amazon flood wave hydraulics. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 374, n. 1–2, p. 92–105, 2009.

VERMAAK, Herman Jacobus; KUSAKANA, Kanzumba; KOKO, Sandile Philip. Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 29, p. 625–633, 2014.

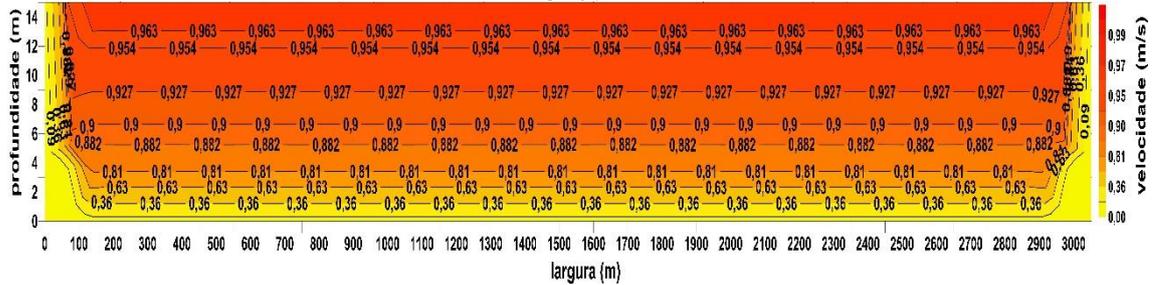
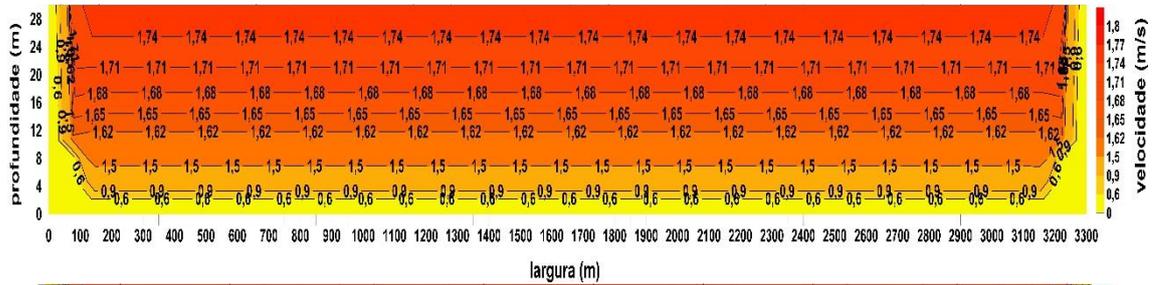
YUCE, M. Ishak; MURATOGLU, Abdullah. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 43, p. 72–82, 2015.

APÊNDICE A

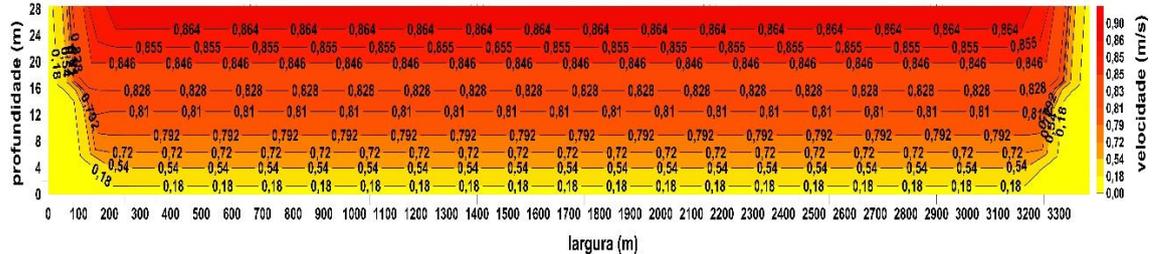
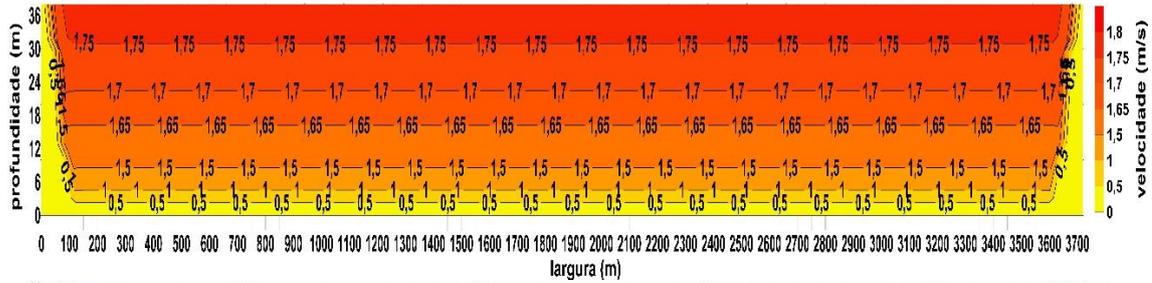
Isolinhas de velocidades rio Amazonas – Est. 10100000 - maior e menor vazão.



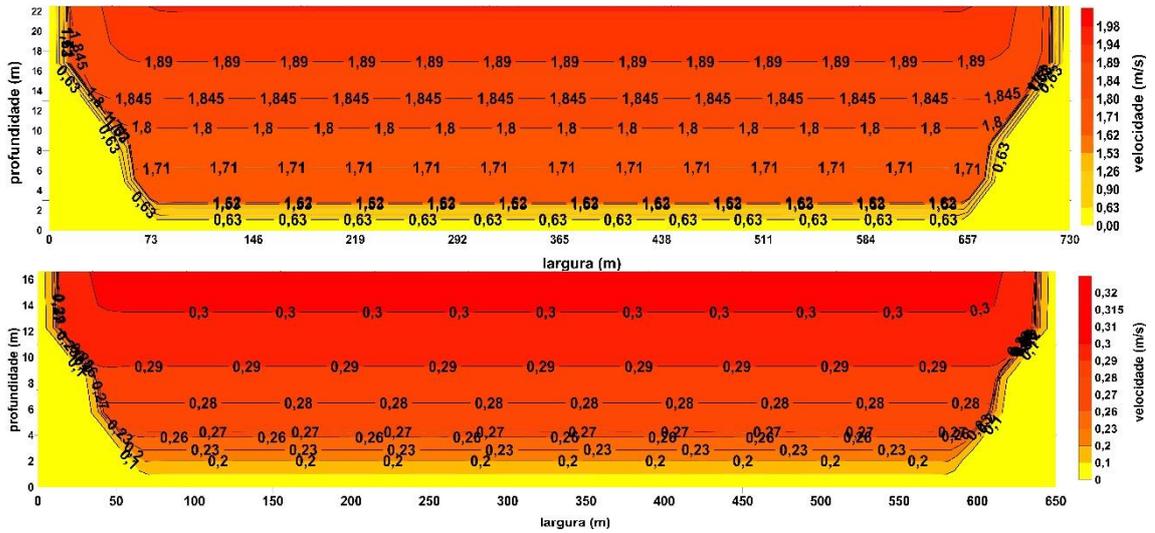
Isolinhas de velocidades rio Amazonas – Est.14100000 - maior e menor vazão.



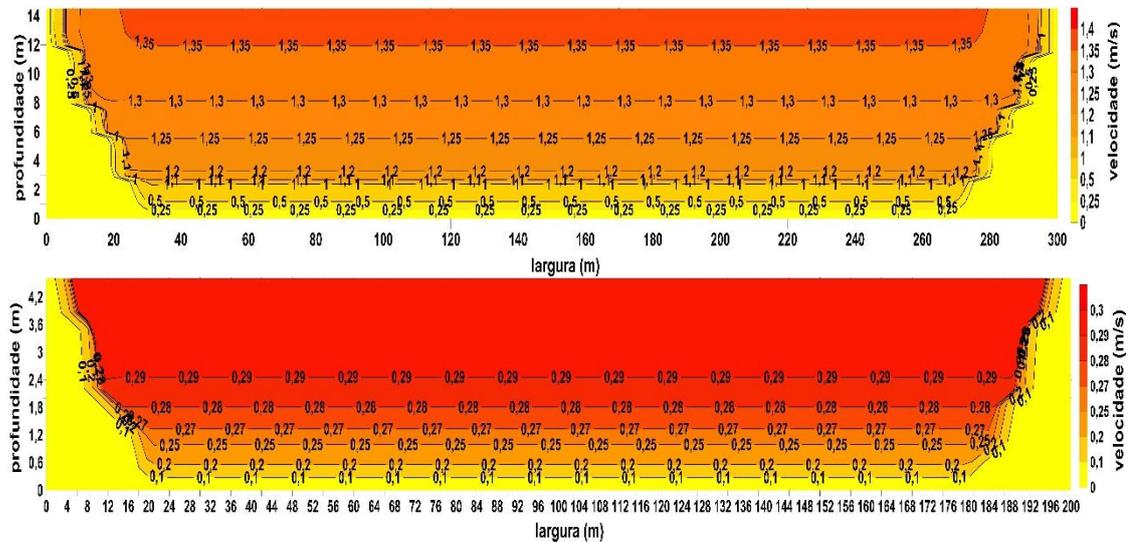
Isolinhas de velocidades rio Amazonas – Est.14100000 - maior e menor vazão.



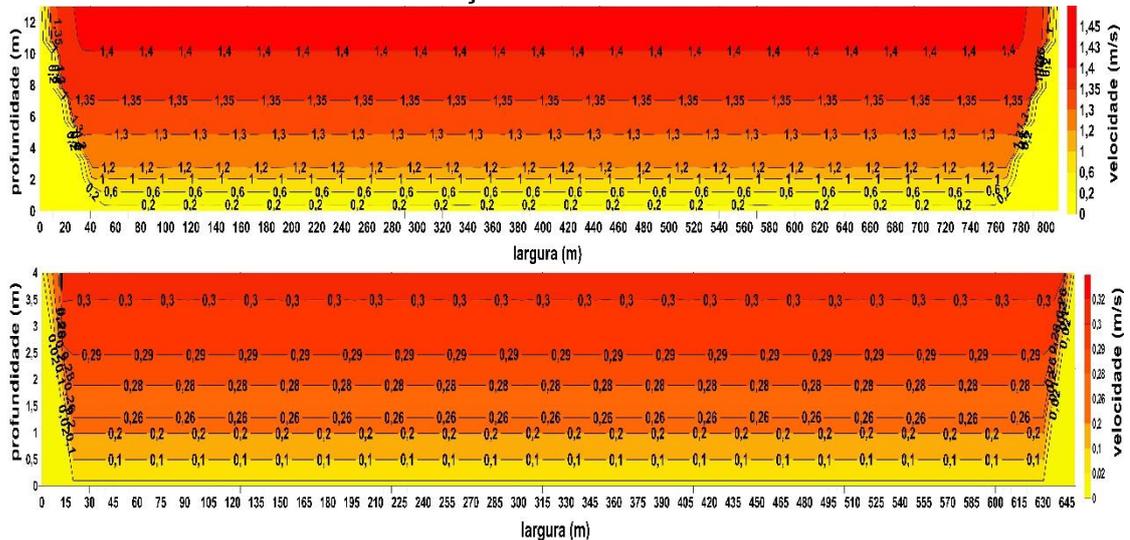
Isolinhas de velocidades rio Purus – Est.13962000 - maior e menor vazão.



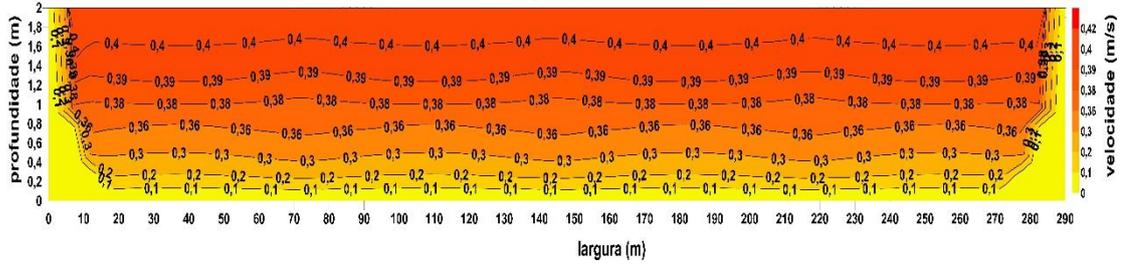
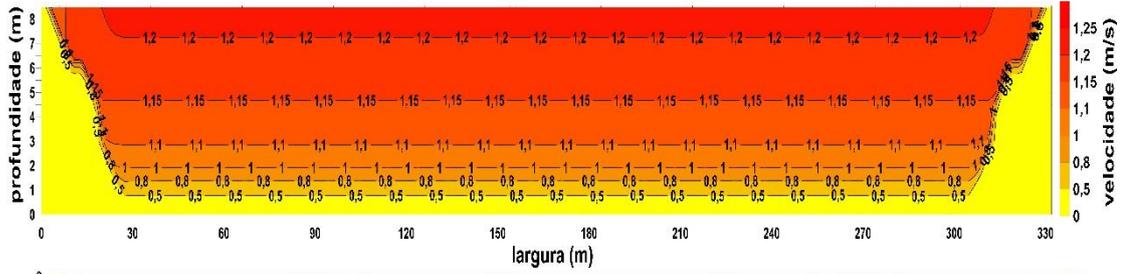
Isolinhas de velocidades rio Javari – Est.1050000 - maior e menor vazão.



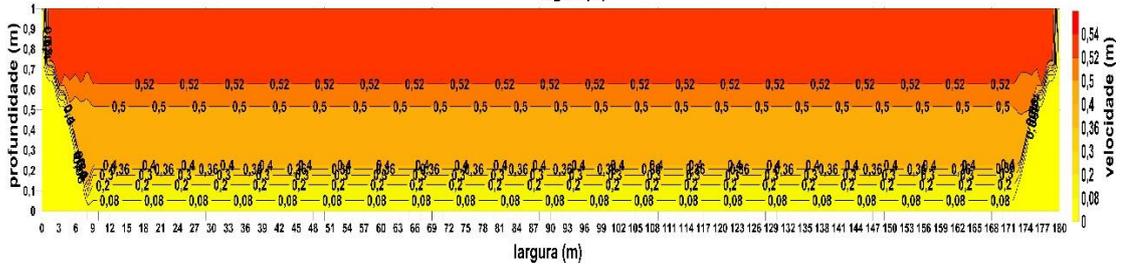
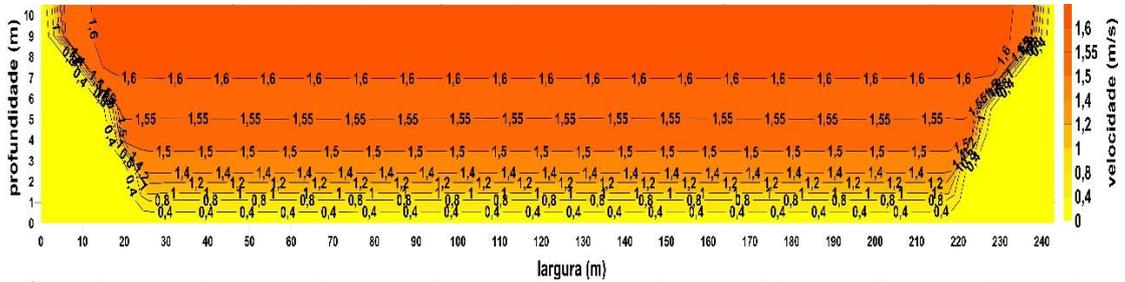
Isolinhas de velocidades rio Iça – Est.11444900 - maior e menor vazão.



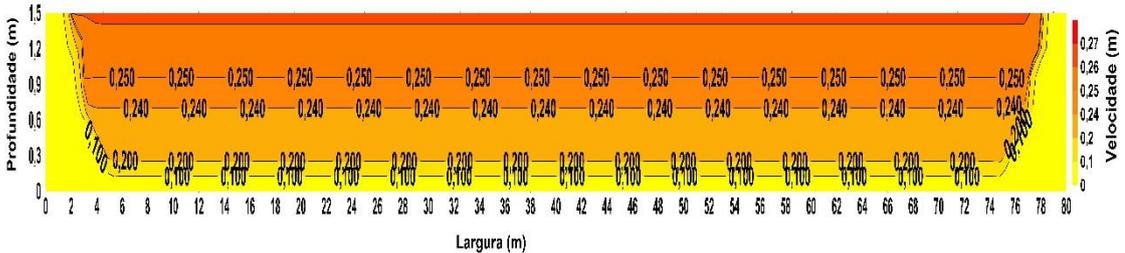
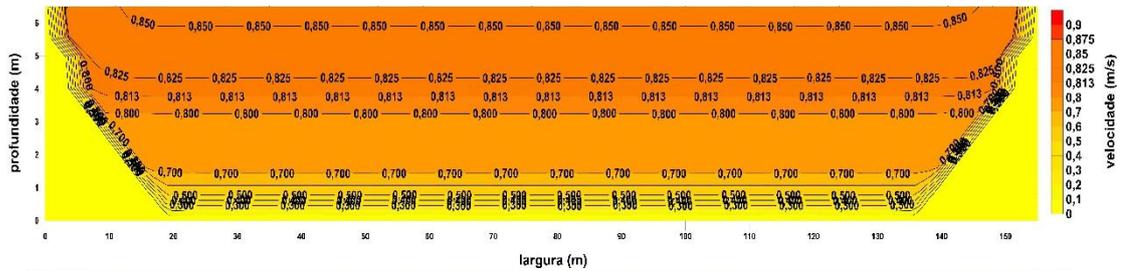
Isolinhas de velocidades rio Juntaí – Est.12200000 - maior e menor vazão.



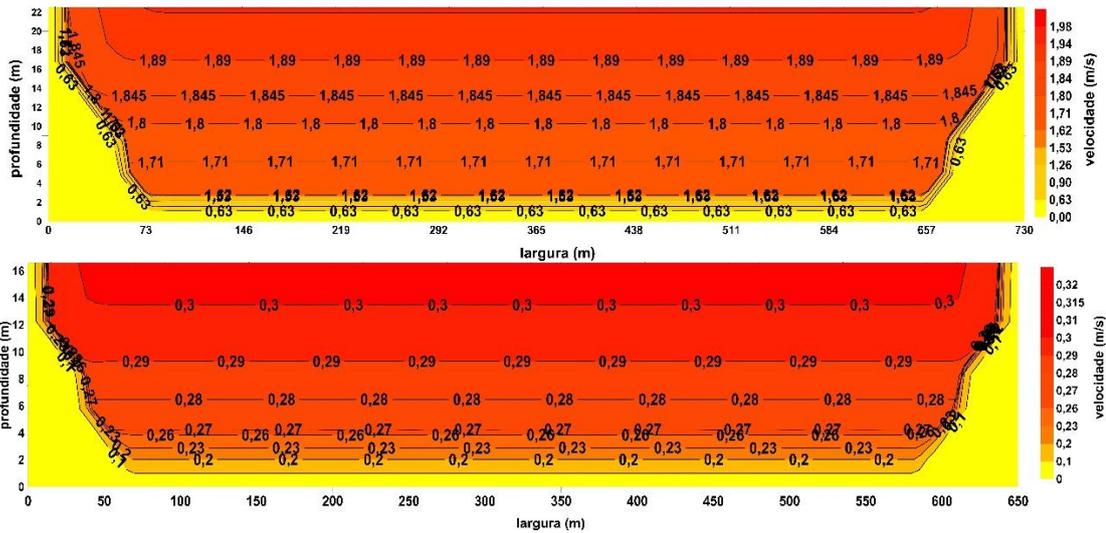
Isolinhas de velocidades rio Juruá – Est.12520000 – maior e menor vazão.



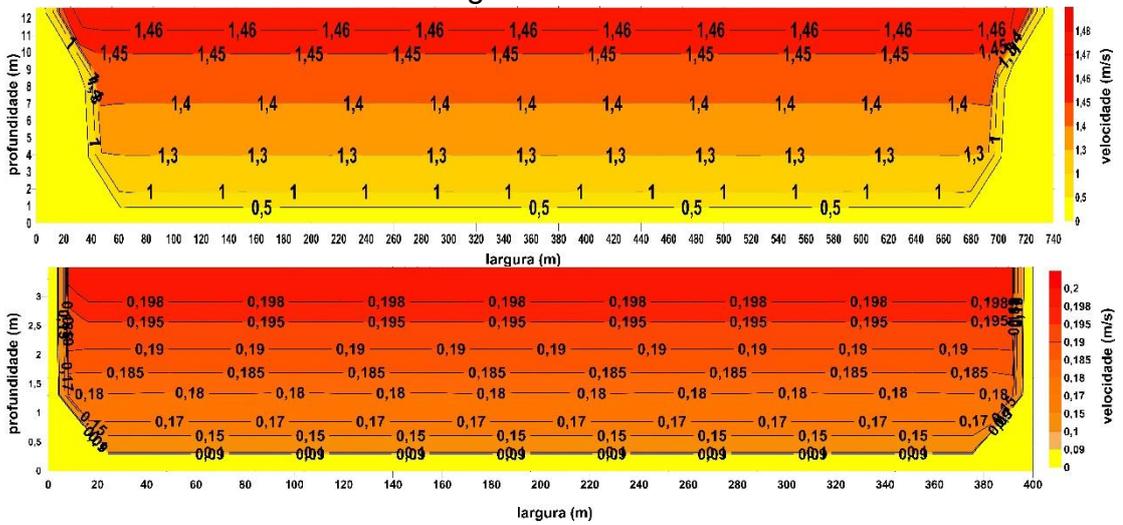
Isolinhas de velocidades rio Coari – Est.13100000 - maior e menor vazão.



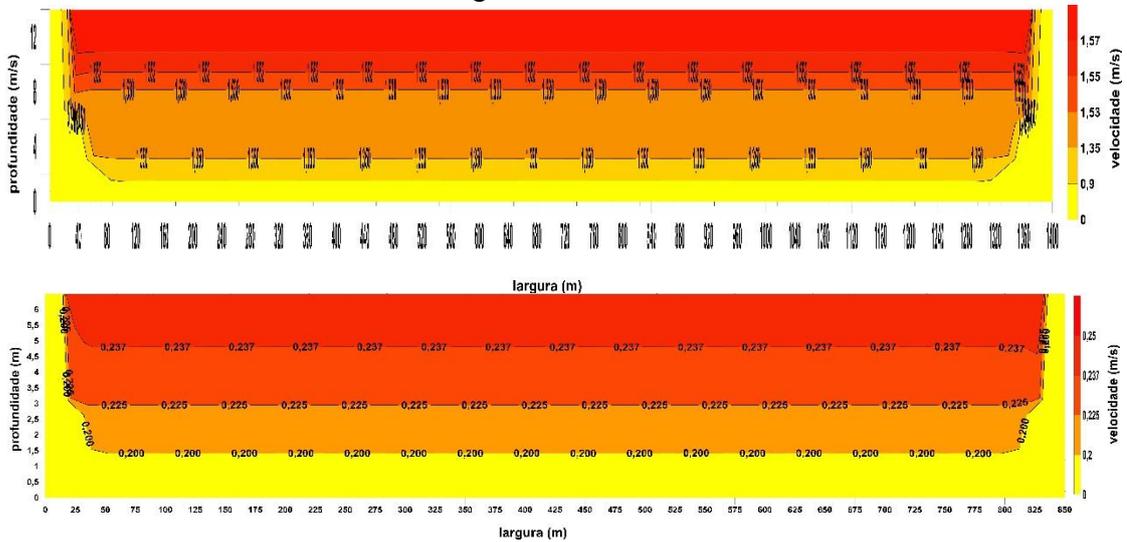
Isolinhas de velocidades rio Purus – Est.13962000 - maior e menor vazão.



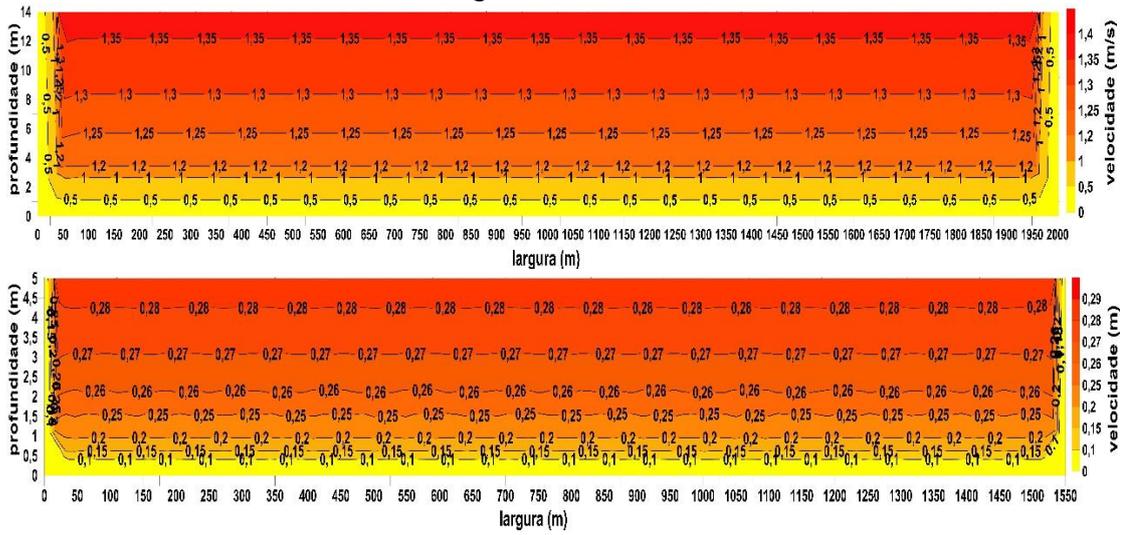
Isolinhas de velocidades rio Negro – Est.14110000 - maior e menor vazão.



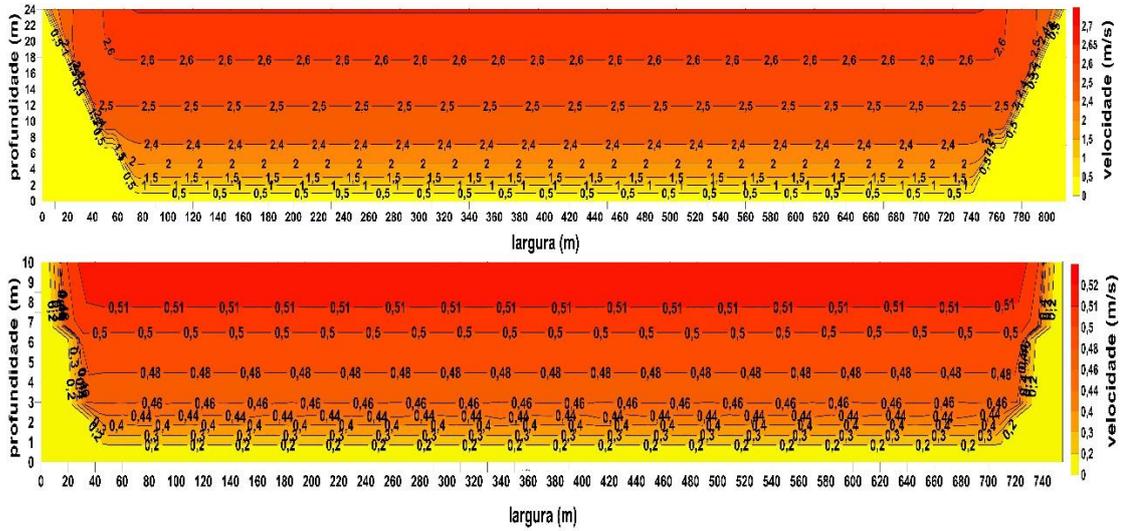
Isolinhas de velocidades rio Negro – Est.14330000 - maior e menor vazão.



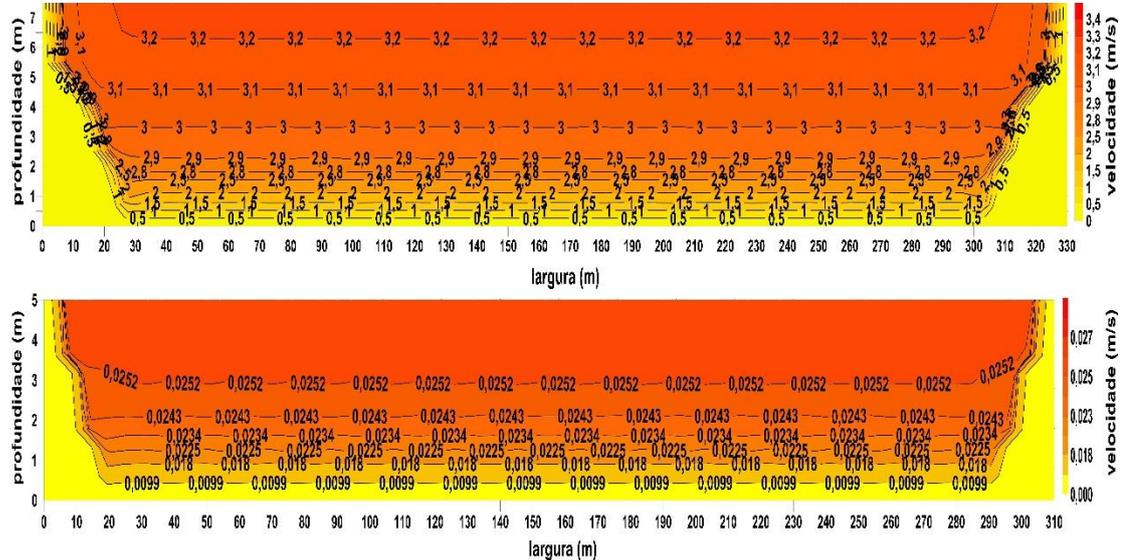
Isolinhas de velocidades rio Negro – Est.14420000 - maior e menor vazão.



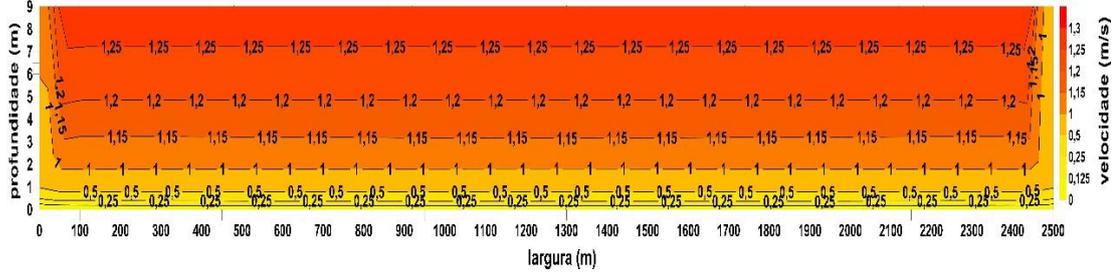
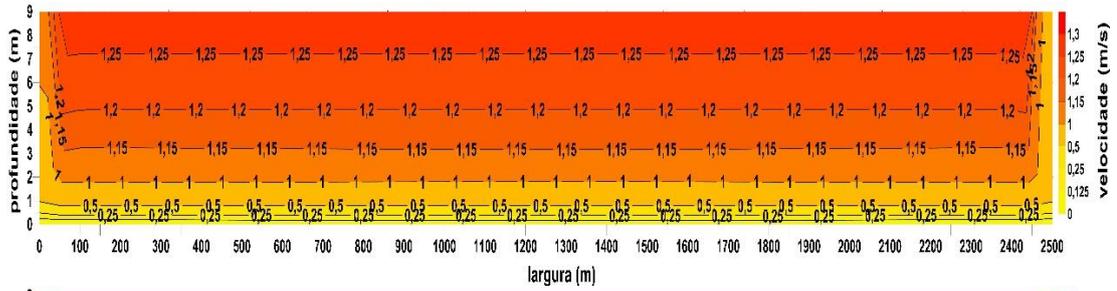
Isolinhas de velocidades rio madeira – Est.14340000 - maior e menor vazão.



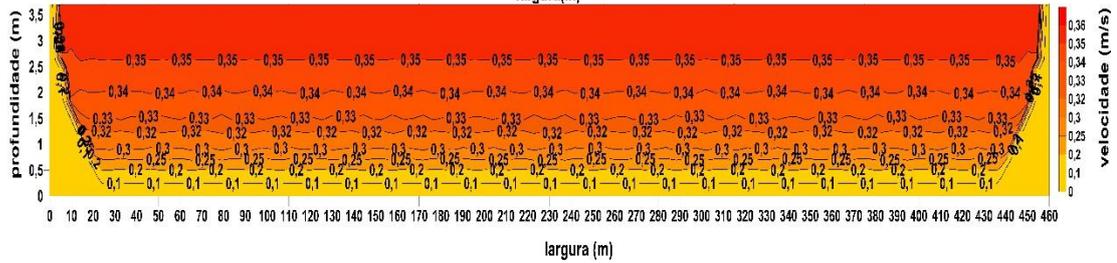
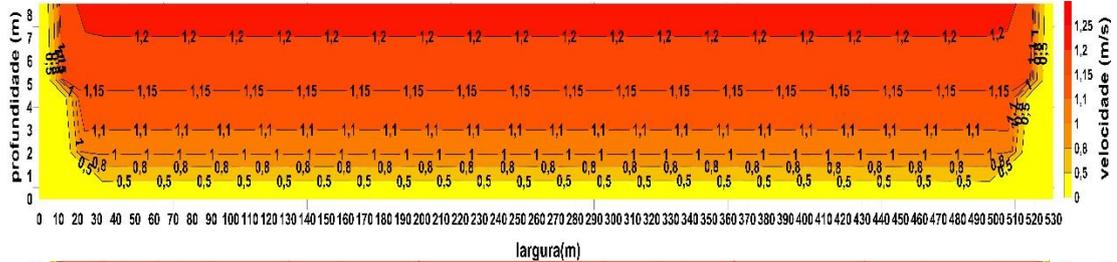
Isolinhas de velocidades rio Trombetas – Est.16430000 - maior e menor vazão.



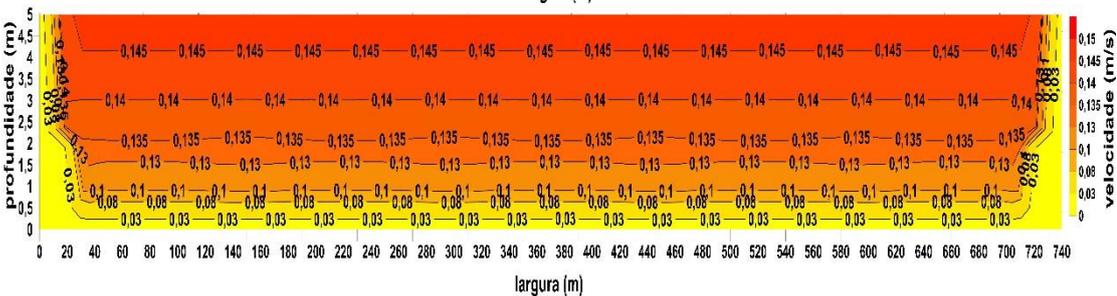
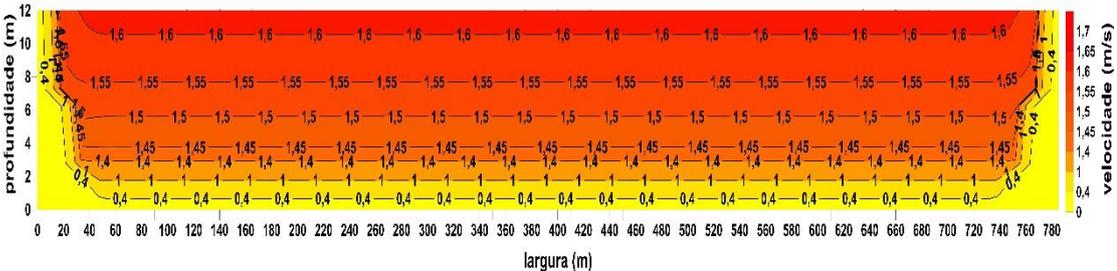
Isolinhas de velocidades rio Tapajós – Est.17500000 - maior e menor vazão.



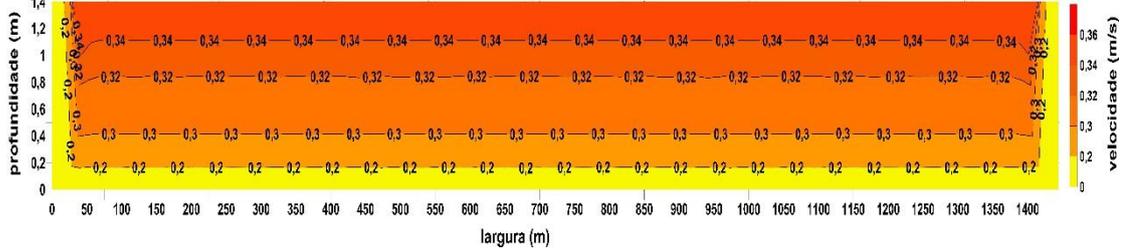
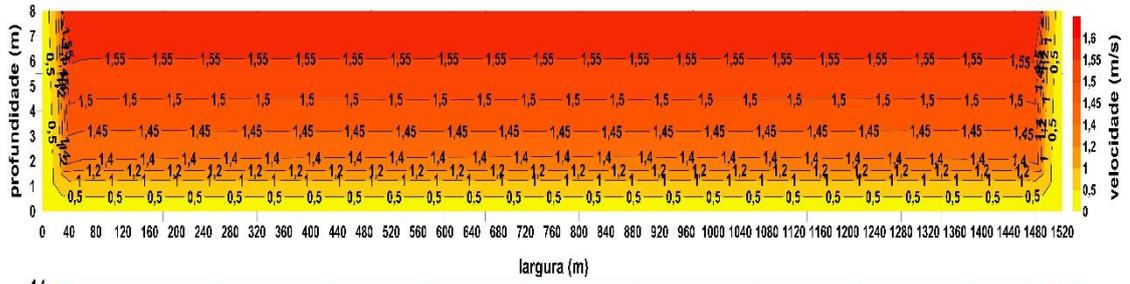
Isolinhas de velocidades rio Xingu – Est.18430000 - maior e menor vazão.



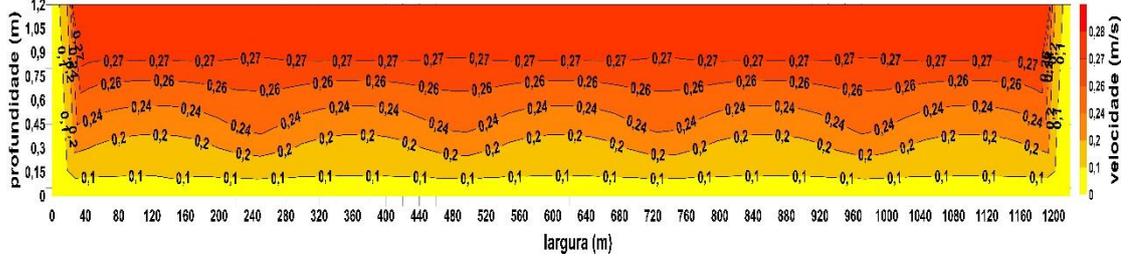
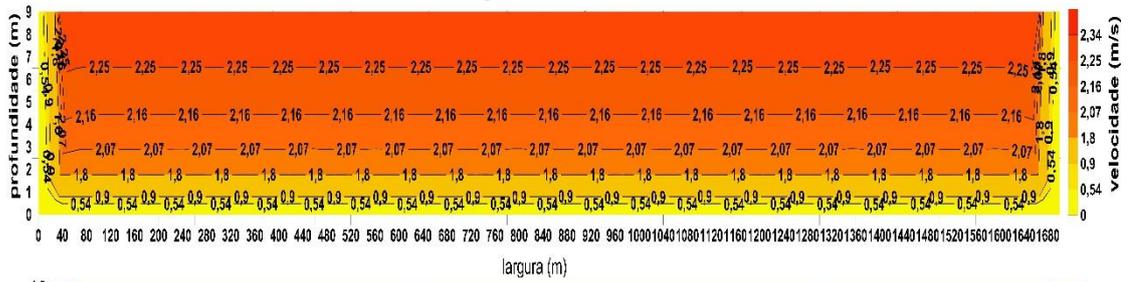
Isolinhas de velocidades rio Xingu – Est.18460000 - maior e menor vazão.



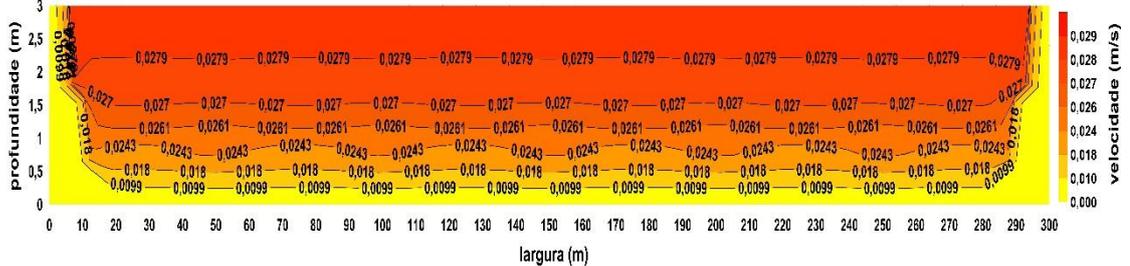
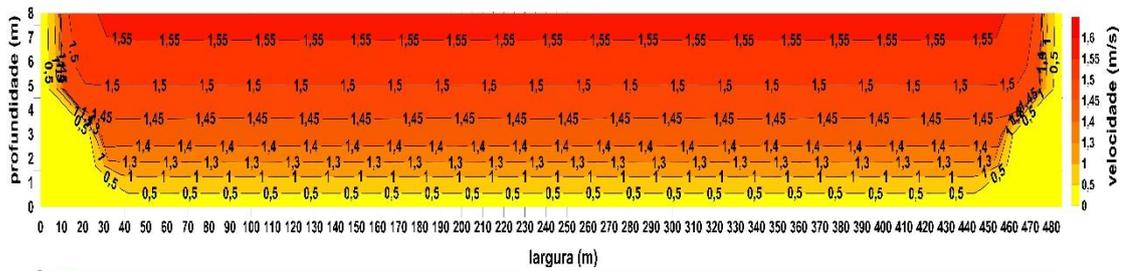
Isolinhas de velocidades rio Xingu – Est.18510000 - maior e menor vazão.



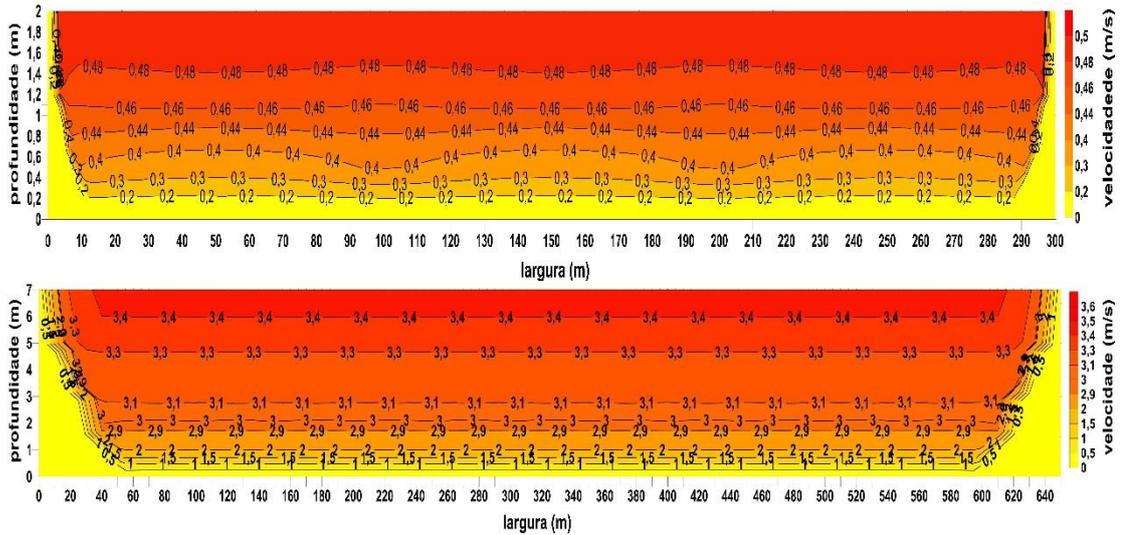
Isolinhas de velocidades rio Xingu – Est.18850000 - maior e menor vazão.



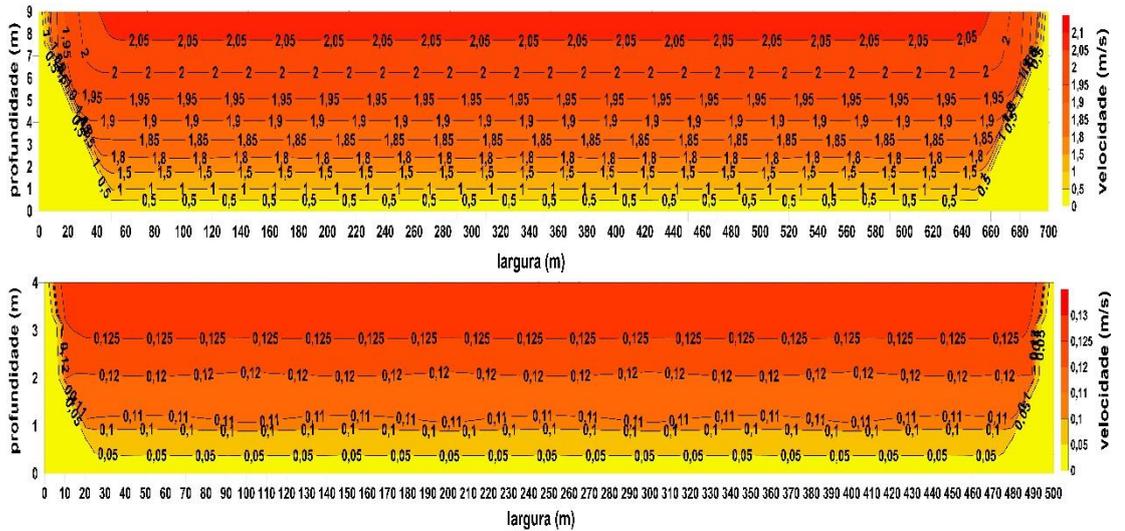
Isolinhas de velocidades rio Jari – Est.19150000 - maior e menor vazão.



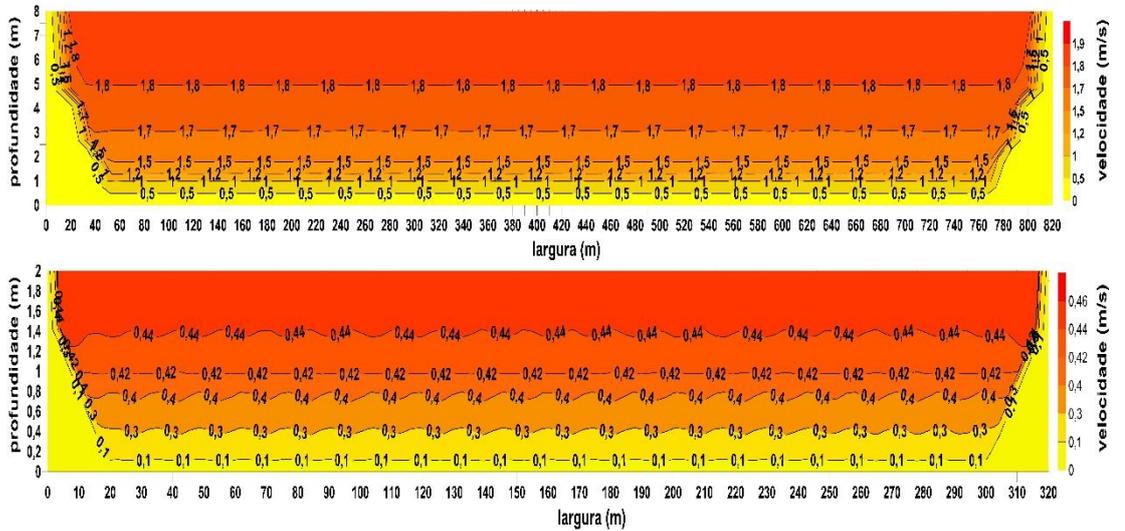
Isolinhas de velocidades rio São Francisco – 44290002 - maior e menor vazão.



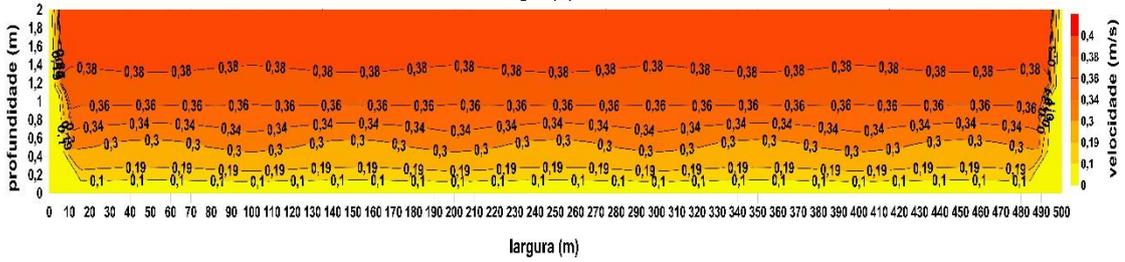
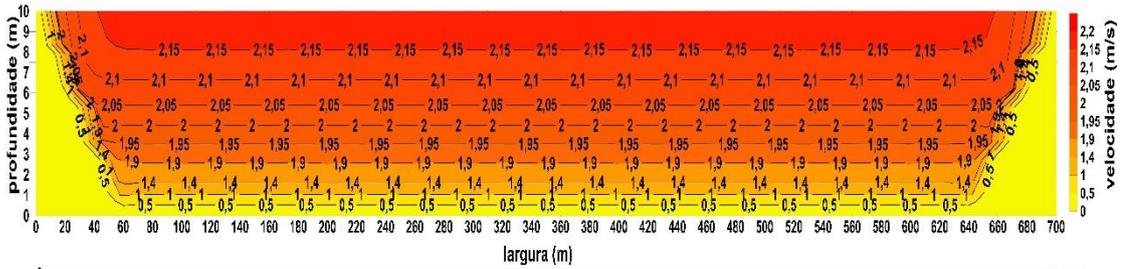
Isolinhas de velocidades rio São Francisco – 44500000 - maior e menor vazão.



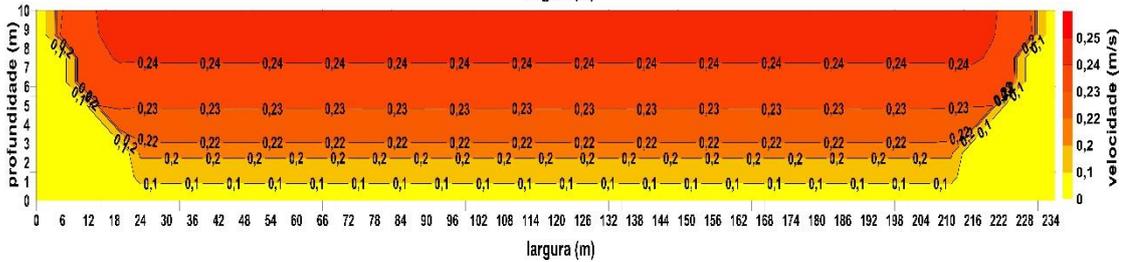
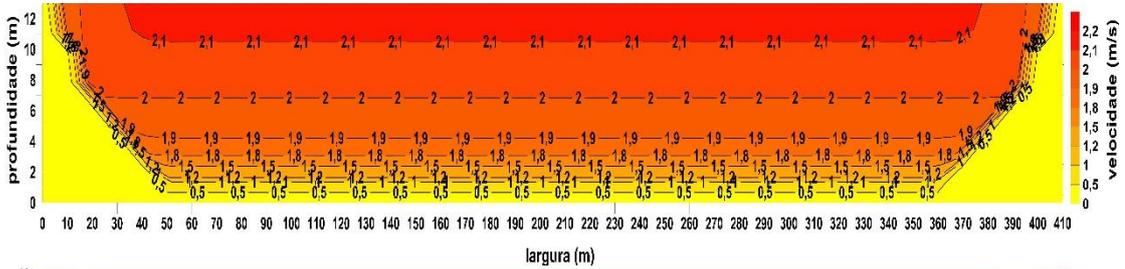
Isolinhas de velocidades rio São Francisco – 45480000 - maior e menor vazão.



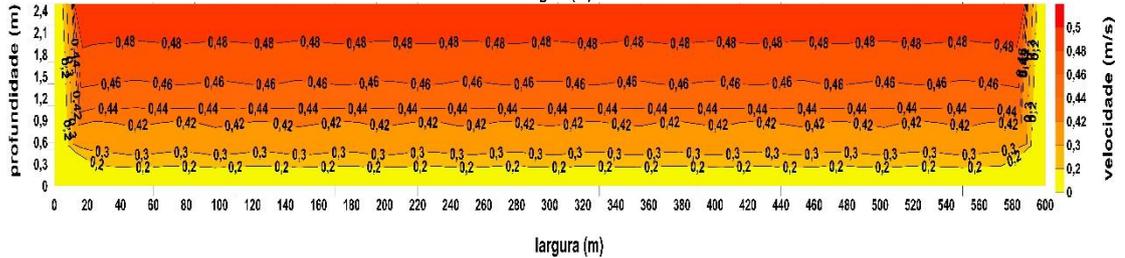
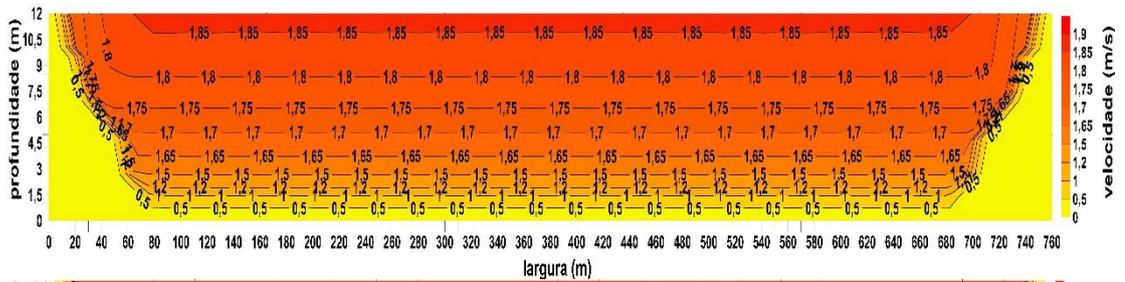
Isolinhas de velocidades rio São Francisco – 46105000 - maior e menor vazão.



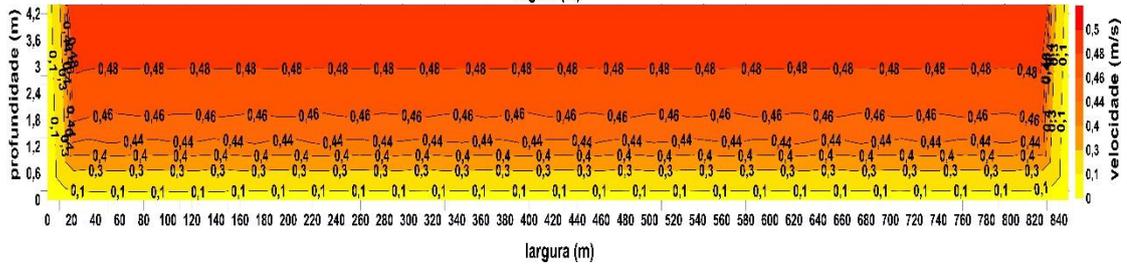
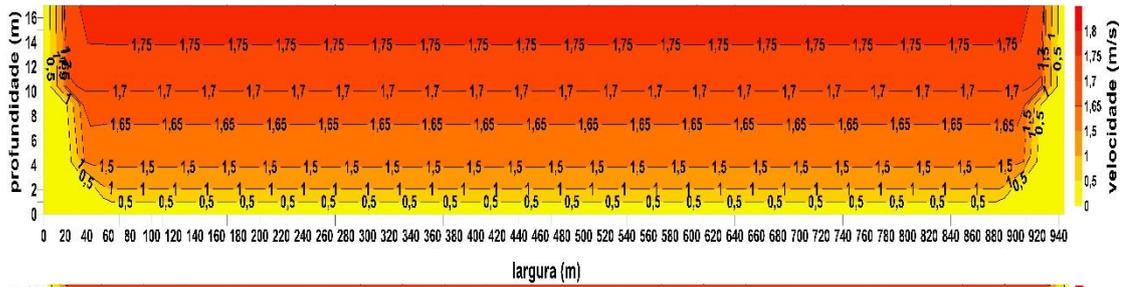
Isolinhas de velocidades rio São Francisco – 49330000 - maior e menor vazão.



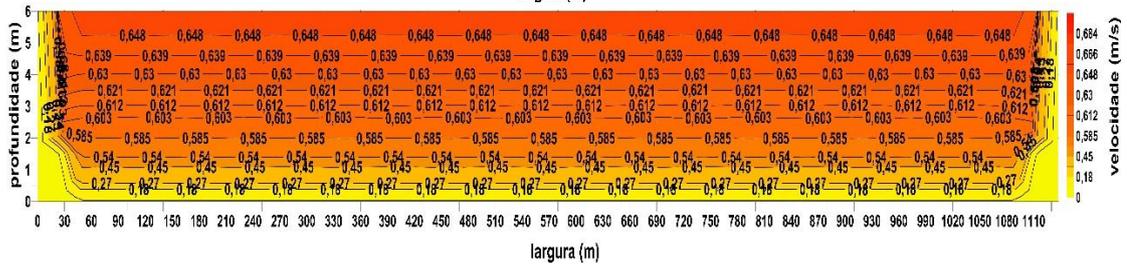
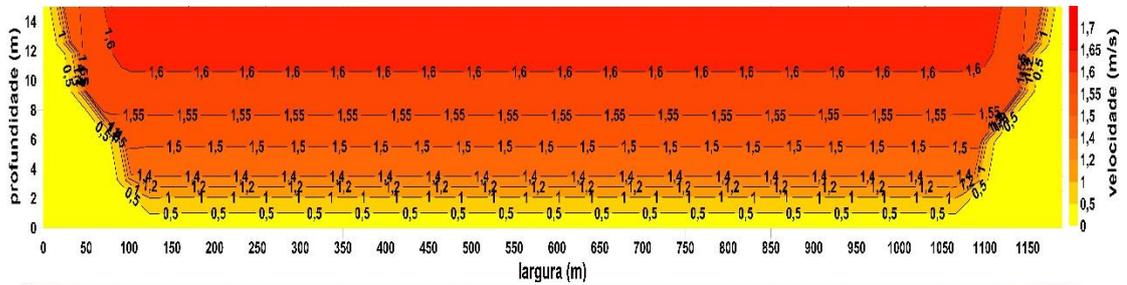
Isolinhas de velocidades rio São Francisco – 49370000 - maior e menor vazão.



Isolinhas de velocidades rio Paraná – 63010000 - maior e menor vazão.



Isolinhas de velocidades rio Paraná – 64575003 - maior e menor vazão.



APÊNDICE B

Diâmetro do material do leito de cada seção transversal.

COD-ESTAÇÃO	largura	profundidade	RIOS	Vazão observada (m³/s)	velocidade média (m/s)	D50 (m)
10100000	1155	25	RIO SOLIMÕES/AMAZONAS	58915,17	2,034	0,006
	790	16		10065,14	0,794	0,006
10500000	300	14,5	RIO JAVARI	5462,89	1,250	0,006
	200	3,5		190,01	0,270	0,006
11444900	810	13	RIO PUTOMAYO/IÇA	13776,00	1,305	0,006
	650	4		720,00	0,277	0,006
12200000	332	8,5	RIO JUNTAÍ	3144,76	1,110	0,003
	290	2		212,93	0,366	0,003
12520000	243	10,5	RIO JURUÁ	3883,08	1,514	0,004
	180	1		86,66	0,480	0,006
13100000	155,5	6,5	RIO COARI	788,75	0,777	0,006
	80	1,5		28,25	0,234	0,006
13962000	730	25	RIO PURUS	32795,80	1,788	0,006
	650	15		2707,24	0,277	0,006
14100000	3300	30	AMAZONAS	160629,90	1,621	0,006
	3050	15		40797,91	0,891	0,006
14110000	740	12,5	RIO NEGRO	12515,00	1,350	0,006
	400	3,5		254,00	0,181	0,006
14330000	1400	14	RIO NEGRO	28873,77	1,471	0,006
	850	3,5		1228,75	0,222	0,006
14420000	2002	14	RIO NEGRO	35001,46	1,248	0,006
	1550	5		1993,73	0,257	0,006
15340000	815	24	RIO MADEIRA	47840,00	2,435	0,010
	755	10		3580,00	0,473	0,01
16030000	3720	38	RIO SOLIMÕES/AMAZONAS	231950,80	1,639	0,006
	3399	28,5		77811,24	0,801	0,006
16430000	330	7,5	RIO TROMBETAS	7342,00	2,954	0,004
	310	5		37,35	0,024	0,004
17500000	2500	9	RIO TAPAJÓS	26151,78	1,162	0,006
	2400	4		2954,39	0,308	0,006
18430000	530	8,5	RIO XINGU	5005,00	1,109	0,006
	460	3,7		557,00	0,326	0,006
18460000	785	12	RIO XINGU	13916,00	1,474	0,006
	740	5		495,00	0,134	0,006
18510000	1520	8	RIO XINGU	17604,00	1,447	0,006
	1444	1,4		623,00	0,308	0,006
18850000	1700	9	RIO XINGU	32330,00	2,112	0,006
	1220	1,2		365,00	0,249	0,006
19150000	485	8	RIO JARI	5545,00	1,424	0,006
	300	3		23,30	0,026	0,006
44290002	650	7	RIO SÃO FRANCISCO	14094,00	3,087	0,02
	300	2		262,92	0,437	0,02
44500000	700	9	RIO SÃO FRANCISCO	11792,15	1,864	0,02
	500	4		231,50	0,116	0,02
45480000	820	8	RIO SÃO FRANCISCO	11193,81	1,7	0,02
	320	2		260,96	0,407	0,01
46105000	700	10	RIO SÃO FRANCISCO	13841,32	1,967	0,02
	500	2		350,19	0,35	0,02
49330000	410	13	RIO SÃO FRANCISCO	10327,00	1,926	0,02
	235	10		528,62	0,224	0,01
49370000	760	12	RIO SÃO FRANCISCO	15397,05	1,679	0,02
	600	2,5		652,84	0,434	0,02
63010000	945	17	RIO PARANÁ	26342,50	1,637	0,006
	848	4,4		1695,00	0,454	0,006
64575003	1190	15	RIO PARANÁ	26987,50	1,504	0,006
	1137	6		4062,30	0,594	0,006