



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA DE ENERGIA**

**PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROcinÉTICOS  
COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS PRELIMINARES NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ**

**MARCOS AURÉLIO DE ARAUJO**

Foz do Iguaçu  
2016

**PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROCINÉTICOS  
COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS PRELIMINARES NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ**

**MARCOS AURÉLIO DE ARAUJO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Walber Ferreira Braga.  
Coorientador: Prof. Dr. Glaucio Roloff.

**MARCOS AURÉLIO DE ARAUJO**

**PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROCINÉTICOS**  
COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS PRELIMINARES NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Walber Ferreira Braga  
UNILA

---

Coorientador: Prof. Dr. Glaucio Roloff  
UNILA

---

Prof. Dr. Jiam Pires Frigo  
UNILA

Dedico este trabalho aos meus pais, Vilson José de Araujo "*In Memoriam*" e Crissantina Cidral da Costa, pela minha existência, pois sem eles este trabalho e muitos dos meus sonhos não se realizariam.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer, a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A minha esposa, Elizane e meus filhos, Christian e Christopher, pela convivência e amparo do dia-a-dia, que sempre tiveram paciência e confiança.

Aos meus irmãos, Meiry, João Luiz, Miriam e Adriana, ao incentivo, apoio e estímulo para enfrentar as barreiras da vida.

Ao meu cunhado André, pelo apoio nos trabalhos de campo.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao meu orientador, Walber Ferreira Braga, pela paciência e confiança ao longo das supervisões das minhas atividades.

Ao meu coorientador, Glaucio Roloff, que me ajudou nesta etapa final.

Agradeço aos professores que desempenharam com dedicação as aulas ministradas.

Agradeço aos meus colegas de classe, pela amizade, paciência e convivência destes anos, que serão inesquecíveis.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*“A persistência é o menor caminho do êxito”.*  
**Charles Spencer Chaplin**

ARAUJO, Marcos Aurélio de. **Prospecção de Parques Hidrocinéticos**: Comparação entre Projetos Preliminares nos Rios Iguaçu e Paraná. 2016. 60 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2016.

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado uma análise preliminar e comparativa entre dois estudos de prospecção de parques hidrocinéticos, um no rio Iguaçu e outro no rio Paraná. Estes rios apesar de portes diferentes, apresentam todas as condições necessárias para instalação de turbinas hidrocinéticas de mesma configuração, a diferença entre eles é a vazão, o rio Paraná possui uma vazão média dez vezes maior que o rio Iguaçu. Os locais propostos para instalação dos parques hidrocinéticos, ficam a jusante das Cataratas do Iguaçu e a jusante da Itaipu Binacional, nos rios Iguaçu e Paraná respectivamente. O parque hidrocinético desta proposta comportará duas turbinas de 500 kW, totalizando 1 MW de potência instalada. O propósito do estudo é relacionar os pontos que influenciam na prospecção de um parque hidrocinético, fornecendo as ferramentas necessárias para fazer uma avaliação preliminar, evitando com isso investimentos desnecessários em estudos que podem ser realizados em um projeto mais detalhado. Para o desenvolvimento deste trabalho, primeiro, foi escolhido o trecho do rio mais apropriado, foi averiguado em seguida se o local atendia aos requisitos de largura e profundidade. De posse dos dados de vazão coletados nos postos fluviométricos e a área da secção transversal dos rios, a velocidade média do curso da água foi calculada. Com os resultados, foi possível comparar a energia produzida nos dois locais, para finalmente decidir qual local para instalação do parque seria melhor. A prospecção de parques hidrocinéticos consiste na escolha do local para instalação das turbinas, da avaliação da velocidade, largura e profundidade do fluxo de água. O estudo é necessário, pois a energia gerada depende da velocidade do fluxo da água, do diâmetro do rotor e do rendimento do sistema. A escolha da turbina hidrocinética de 500 kW, deve-se ao fato de que a sua concepção, com todos os detalhes técnicos, está sendo matéria de estudo pelo Projeto Tucunaré, idealizado pela Universidade de Brasília e auxiliada financeiramente pela Eletronorte. O propósito do Projeto Tucunaré é o aproveitamento da energia hídrica residual e já turbinada pela Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no rio Tocantins, estado do Pará. Para estimar a velocidade dos rios em qualquer altura de cota, a área hidráulica da secção transversal dos rios foi obtida através de cálculo de polígonos irregulares e então traçado as linhas de tendências. Com os dados em mãos, foi estimada a energia anual gerada para os trechos dos rios Iguaçu e Paraná. Em uma análise preliminar, considerando as características, condições operacionais e dimensões da turbina, as secções dos rios selecionadas e os requisitos em largura, profundidade e velocidade da água, indicam a produção média de 319,78 MW/ano para o rio Iguaçu e 1.360,52 MW/ano para o rio Paraná. Constatou-se que o rio Paraná possui um potencial energético cerca de 4 vezes maior que o rio Iguaçu, com isso, aproveitando melhor a capacidade das turbinas hidrocinéticas. Após a avaliação preliminar o trecho escolhido para instalação, deve ainda ser submetido a batimetria, para comprovação de seu perfil transversal e uma aferição da velocidade do rio com equipamento ADCP.

**Palavras-chave:** Parque Hidrocinético. Turbina Hidrocinética. Projeto Tucunaré. Rio Iguaçu. Rio Paraná.

ARAUJO, Marcos Aurélio de. **Prospecção de Parques Hidrocinéticos: Comparação entre Projetos Preliminares nos Rios Iguaçu e Paraná.** 2016. 60 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2016.

## ABSTRACT

This work presents a preliminary and comparative analysis between two studies of prospecting of hydrokinetic parks, one in the Iguaçu River and the other in the Paraná River. These rivers, despite different sizes, present all the necessary conditions for the installation of hydrokinetic turbines of the same configuration, the difference between them being the flow, the Paraná river has an average flow ten times greater than the Iguaçu river. The proposed sites for the installation of the hydrokinetic parks are located downstream from the Iguaçu Falls and downstream from Itaipu Binacional, on the Iguaçu and Paraná rivers, respectively. The hydrokinetic park of this proposal will include two 500 kW turbines, totaling 1 MW of installed capacity. The purpose of the study is to relate the points that influence the prospecting of a hydrokinetic park, providing the necessary tools to make a preliminary evaluation, thus avoiding unnecessary investments in studies that can be carried out in a more detailed project. For the development of this work, first, the most appropriate river stretch was chosen, and the site was then checked for width and depth requirements. Based on the flow data collected at the fluvimetric stations and the cross-sectional area of the rivers, the mean velocity of the water course was calculated. With the results, it was possible to compare the energy produced in the two sites, to finally decide which place to install the park would be better. The exploration of hydrokinetic parks consists of the choice of the place for installation of the turbines, the evaluation of the speed, width and depth of the water flow. The study is necessary because the energy generated depends on the speed of the water flow, the diameter of the rotor and the efficiency of the system. The choice of the hydrokinetic turbine of 500 kW is due to the fact that its design, with all the technical details, is being studied by the Tucunará Project, idealized by the University of Brasília and financially aided by Eletronorte. The purpose of the Tucunará Project is to take advantage of the residual hydroelectric energy already tilted by the Tucuruí Hydroelectric Power Plant on the Tocantins River, in the state of Pará. In order to estimate the velocity of the rivers at any height, the hydraulic cross-sectional area of the rivers was obtained by calculating irregular polygons and then tracing the trend lines. With the data in hand, the annual energy generated for the stretches of the Iguaçu and Paraná rivers was estimated. In a preliminary analysis, considering the characteristics, operating conditions and dimensions of the turbine, the sections of the rivers selected and the requirements in water width, depth and velocity, indicate the average production of 319.78 MW/year for the Iguaçu River and 1,360.52 MW/year for the Paraná River. It was verified that the Paraná river has an energetic potential about 4 times greater than the Iguaçu river, with this, taking advantage of the capacity of the hydrokinetic turbines. After the preliminary evaluation, the chosen section for installation should also be submitted to bathymetry, to prove its transversal profile and a river velocity measurement with ADCP equipment.

**Keywords:** Hydrokinetic Park. Hydrokinetic Turbine. Tucunará Project. Iguaçu River. Paraná River.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Locais escolhidos para o estudo de instalação de PHC.....	14
Figura 2 - Classificação das THCs.....	15
Figura 3 - Imagens dos arranjos para as THCs .....	16
Figura 4 - Curva de desempenho das THCs (adimensional) .....	17
Figura 5 - Mapa de Projetos de Tecnologia Marinha e Hidrocinética.....	18
Figura 6 - Turbina G3.....	19
Figura 7 - Curva CP x TSR para o difusor anular com perfil NACA 10510 .....	20
Figura 8 - Determinação da velocidade do rio pelo método do flutuador.....	22
Figura 9 - Localização da bacia do Paraná.....	24
Figura 10 - Temas que compõem o Projeto Tucunaré .....	25
Figura 11 - Ilustração da turbina encaixada no difusor e flutuador .....	27
Figura 12 - Vista explodida dos componentes da THC .....	27
Figura 13 - Sistema de flutuação e fundeio para a THC .....	28
Figura 14 - Localização dos postos fluviométricos .....	31
Figura 15 - Locais propostos para instalação dos PHCs .....	32
Figura 16 - Declividade no local para instalação do PHC no rio Iguaçu .....	33
Figura 17 - Declividade no local para instalação do PHC no rio Paraná .....	33
Figura 18 - Perfil de velocidade de um rio .....	34
Figura 19 - Perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube .....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais .....	25
Tabela 2 - Condições de operação prevista.....	26
Tabela 3 - Principais dimensões .....	26
Tabela 4 - Dados da Estação fluviométrica Salto Cataratas .....	30
Tabela 5 - Dados da Estação fluviométrica Itaipu R-2 .....	30
Tabela 6 - Dados do perfil transversal do rio Iguaçu no posto fluviométrico PNI Museu ...	44
Tabela 7 - Dados do perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube ....	48
Tabela 8 - Energia anual produzida no rio Iguaçu, período 1998-2007 .....	53
Tabela 9 - Energia anual produzida no rio Paraná, período 2003-2012.....	54

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Fluviograma, vazões médias mensais no rio Iguaçu.....	35
Gráfico 2 - Fluviograma, vazões médias mensais no rio Paraná.....	36
Gráfico 3 - Traçado da curva de permanência para vazões médias no rio Iguaçu .....	37
Gráfico 4 - Traçado das curvas de permanência para vazões médias no rio Paraná.....	37
Gráfico 5 - Curva CP x $\lambda$ para o perfil ag04 operando com difusor (adimensional) .....	38
Gráfico 6 - Curva de Potência.....	41
Gráfico 7 - Perfil transversal do rio Iguaçu no posto fluviométrico PNI Museu .....	45
Gráfico 8 - Curva vazão x altura - PNI Museu .....	45
Gráfico 9 - Curva vazão x largura - PNI Museu .....	46
Gráfico 10 - Curva vazão x área - PNI Museu .....	46
Gráfico 11 - Curva vazão x perímetro - PNI Museu .....	47
Gráfico 12 - Perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube .....	49
Gráfico 13 - Curva vazão x altura - late Clube.....	49
Gráfico 14 - Curva vazão x largura - late Clube.....	50
Gráfico 15 - Curva vazão x área - late Clube.....	50
Gráfico 16 - Curva vazão x perímetro - late Clube .....	51
Gráfico 17 - Potência elétrica x Vazão .....	55
Gráfico 18 - Vazão x Velocidade média do rio .....	55
Gráfico 19 - Potência x Velocidade média do rio .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	Perfilador Doppler Acústico de Corrente
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFD	Fluidodinâmica Computacional
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
Eletronorte	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A
HidroWeb	Sistema de Informações Hidrológicas
HTUC	Unidade de Geração Hidrocinética
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
NACA	Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica
PHC	Parque Hidrocinético
PNI	Parque Nacional do Iguaçu
RAS	Relatório Ambiental Simplificado
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
THC	Turbina Hidrocinética
UnB	Universidade de Brasília
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Largura	[m]
$C_P$	Coeficiente de Potência	
$d$	Distância	[m]
$D$	Diâmetro	[m]
$E_C$	Energia cinética	[J]
$EAG$	Energia Anual Gerada	[MWh/ano]
$EP$	Energia Produzida	[MWh/ano]
$FC$	Fator de Capacidade	
$F_r$	Número de Froude	
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Altura	[m]
$m$	Massa	[kg]
$n$	Número de voltas por minuto	[rev/m]
$P_m$	Perímetro molhado	[m]
$P_{el}$	Potência Elétrica	[W]
$P_{hc}$	Potência hidrocínética	[W]
$P_n$	Potência nominal	[kWh]
$Q$	Vazão	[m <sup>3</sup> /s]
$R$	Raio	[m]
$R_h$	Raio hidráulico	[m]
$S$	Declividade	[m/m]
$t$	Tempo	[s]
$v$	Velocidade	[m/s]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$y$	Profundidade	[m]
$\omega$	Velocidade angular	[rad/s]
$\eta_g$	Rendimento geral	
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Razão de velocidade na ponta da pá	

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
1.4 USO DO DIFUSOR	19
1.5 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO	20
1.6 VELOCIDADE DO RIO NO TRECHO DE INTERESSE	20
1.6.1 Método do molinete hidrométrico	21
1.6.2 Método Acústico	21
1.6.3 Método do flutuador	21
1.7 ASPECTOS REGULATÓRIOS	22
1.8 CARACTERÍSTICAS DOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ	23
1.9 PROJETO TUCUNARÉ	24
1.9.1 Características, condições de operação e principais dimensões da THC	25
1.9.2 Partes constituintes da THC	26
1.10 OBJETIVO	28
1.10.1 Objetivo geral	28
1.10.2 Objetivos específicos	28
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
2.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA	29
2.2 ESCOLHA DO LOCAL	31
2.3 FLUVIOGRAMA	35
2.4 CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES	36
2.5 CURVA $C_P \times \lambda$ PARA O PERFIL HIDRODINÂMICO ag04	38
2.6 POTENCIAL ENERGÉTICO HIDROKINÉTICO	39
2.7 CURVA DE POTÊNCIA	41
2.8 ÁREA HIDRÁULICA	41
2.9 FATOR DE CAPACIDADE	42
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>43</b>
3.1 SECÇÃO TRANSVERSAL DO RIO	43
3.2 ESTIMATIVA DA ENERGIA GERADA	51
<b>4 CONCLUSÃO</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Para obtenção de energia elétrica de fontes renováveis e ambientalmente correta é necessário um estudo inicial, no qual verifica-se a viabilidade do potencial disponível. Os aspectos considerados para determinar a viabilidade do projeto, levam em conta os critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais. O atendimento a esses requisitos é importante, pois, mesmo havendo disponibilidade de uma fonte de energia e não havendo demanda, o projeto não alcançará os objetivos econômicos e sociais. Da mesma forma, se o projeto de alguma forma comprometer o ecossistema, prejudicará a qualidade do ar, da água ou da vegetação, provocando mais transtornos que benefícios. A questão técnica envolve uma análise do potencial disponível e a verificação da melhor maneira de obtenção dessa energia, de forma que o aproveitamento tenha o rendimento esperado.

Neste trabalho, será investigado o aproveitamento da energia cinética do fluxo da água e sua conversão em energia elétrica. Para essa análise serão escolhidos dois locais, em rios de diferentes portes, porém que comportem o mesmo equipamento para a conversão de energia. Nesses locais serão simulados Parques Hidrocinéticos (PHC), contendo duas Turbinas Hidrocinéticas (THCs) cada, com potência nominal de 500 kW. Os locais escolhidos para o estudo são os rios Iguaçu e Paraná, por apresentarem todas as condições necessárias para instalação de um PHC. Esses locais são ilustrados na Figura 1.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo para determinar se um local comporta um PHC, requer as medições da profundidade do rio e da velocidade do curso d'água, porém, durante a prospecção, uma avaliação preliminar é suficiente para selecionar ou descartar prováveis locais. Este trabalho compara dois locais com características distintas, porém, em um primeiro momento, aptos a receber um PHC com o mesmo potencial. Essa análise preliminar evita investimentos desnecessários em estudos que podem ser realizados em um projeto mais detalhado. O propósito do estudo é relacionar os pontos que influenciam na prospecção de um PHC.

A contribuição deste trabalho está em disponibilizar as ferramentas necessárias para fazer a avaliação preliminar de prospecção de PHC.

Figura 1 - Locais escolhidos para o estudo de instalação de PHC



Fonte: o autor, 2016

### 1.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As Turbinas Hidrocinéticas Fluviais são máquinas de fluxo motrizes, projetadas para obtenção da energia cinética contida na massa de água em movimento e sua conversão em energia elétrica. Essas turbinas aproveitam a velocidade do fluxo da água nos rios para movimentar as pás do rotor da turbina, que são convertidas em trabalho de eixo para produzir eletricidade.

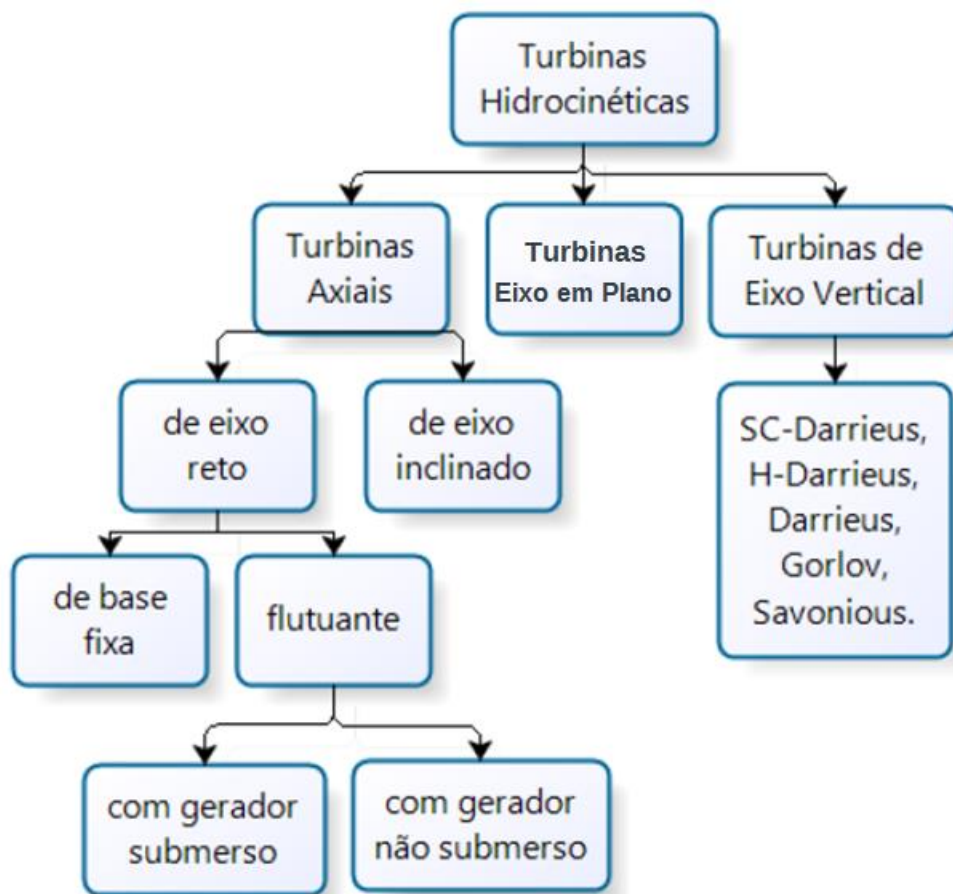
A quantidade de energia gerada depende da velocidade do fluxo da água, do diâmetro do rotor e do rendimento do sistema. Uma das vantagens desse sistema de geração de energia elétrica com relação as hidrelétricas tradicionais é o fato de não necessitar do uso de barragem ou desvio, consequentemente provocando menor impacto ambiental. Por ser a velocidade da água mais constante e com menor variabilidade que a do vento, a energia hidrocinética possui maior confiabilidade no fornecimento de eletricidade que as eólicas.

Parque Hidrocinético é o local onde estão concentradas várias THCs, que são conectadas à rede de transmissão de energia elétrica. O estudo de prospecção de PHCs consiste na escolha do local para instalação das turbinas, da avaliação da

velocidade, largura e profundidade do fluxo de água, estimativa dos valores para o investimento e da avaliação dos impactos ambientais.

Há várias configurações de THCs, bem como maneiras de instalá-las. Os arranjos normalmente adotados são turbinas de eixos axial, em plano e vertical, apresentados por Veloso e Clemente (2013), conforme ilustrado na Figura 2. As imagens para esses arranjos estão ilustradas na Figura 3:

Figura 2 - Classificação das THCs

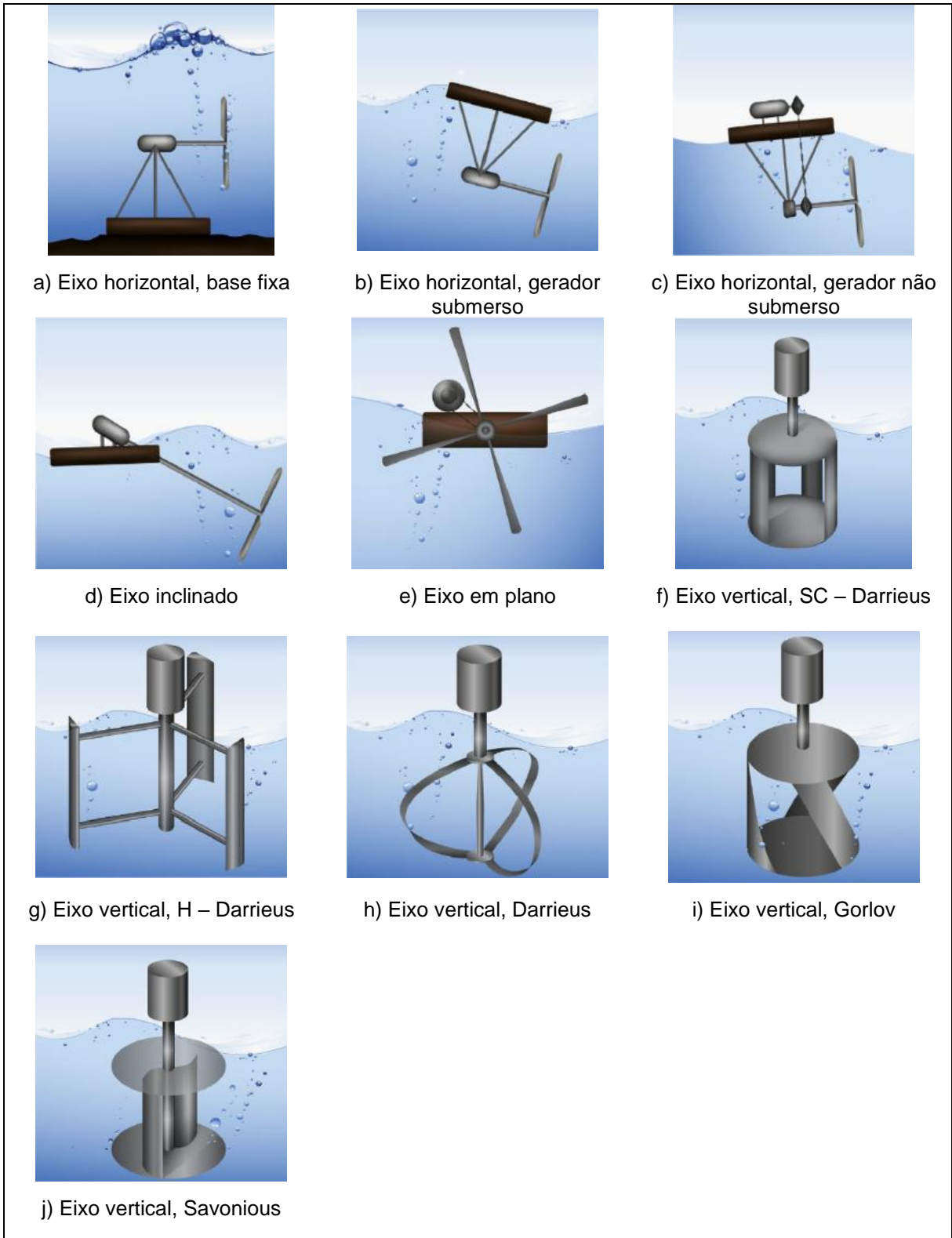


Fonte: VELOSO; CLEMENTE, 2013

As turbinas de eixo horizontal possuem baixo torque de partida e maior eficiência, as de eixo em plano são pouco eficientes e as de eixo vertical operam em qualquer direção do fluido, porém possuem um alto torque de partida (SILVA, 2014). As turbinas de eixo horizontal com gerador não submerso, são menos eficientes, por incluir na transmissão, correias, mancais e engrenagens.



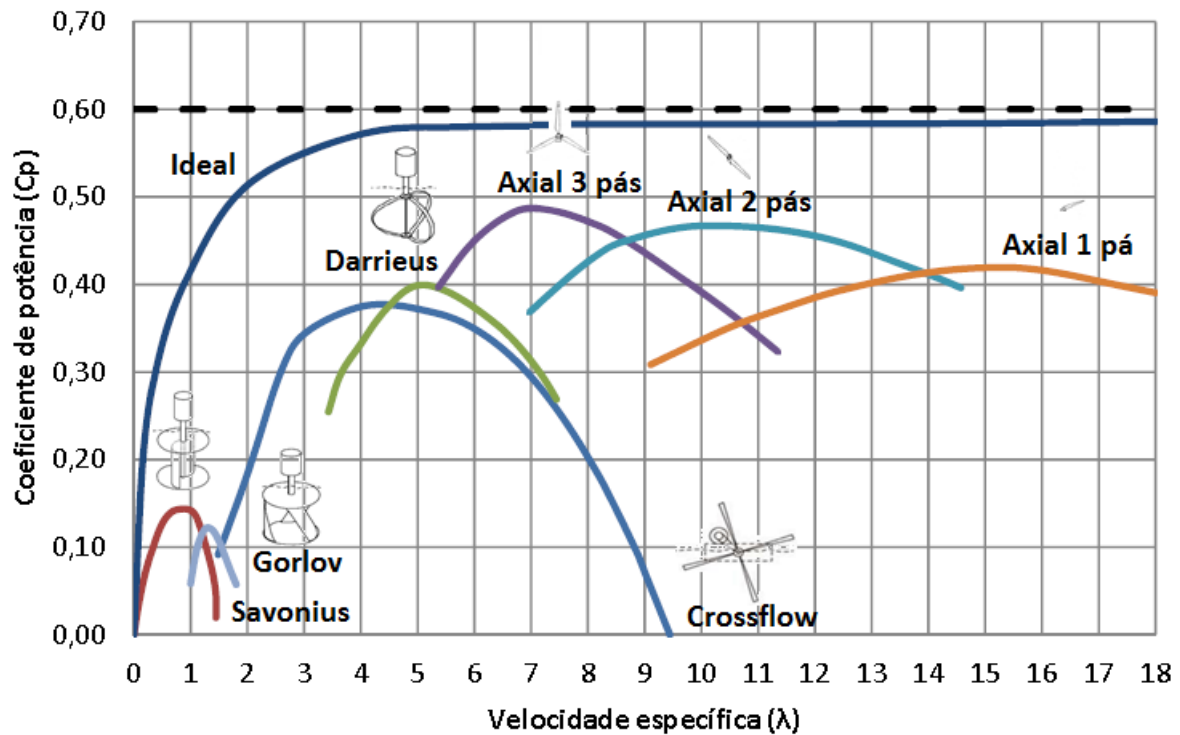
Figura 3 - Imagens dos arranjos para as THCs



Fonte: MAIMUN; BEHROUZI; NAKISA, 2014

Na Figura 4, é ilustrado a curva de desempenho das THC's, que relaciona o Coeficiente de Potência ( $C_p$ ) com a razão de velocidade na ponta da pá ( $\lambda$ ), mostrando que para cada intervalo dessa razão, há um tipo de THC mais apropriado para ser usado.

Figura 4 - Curva de desempenho das THC's (adimensional)

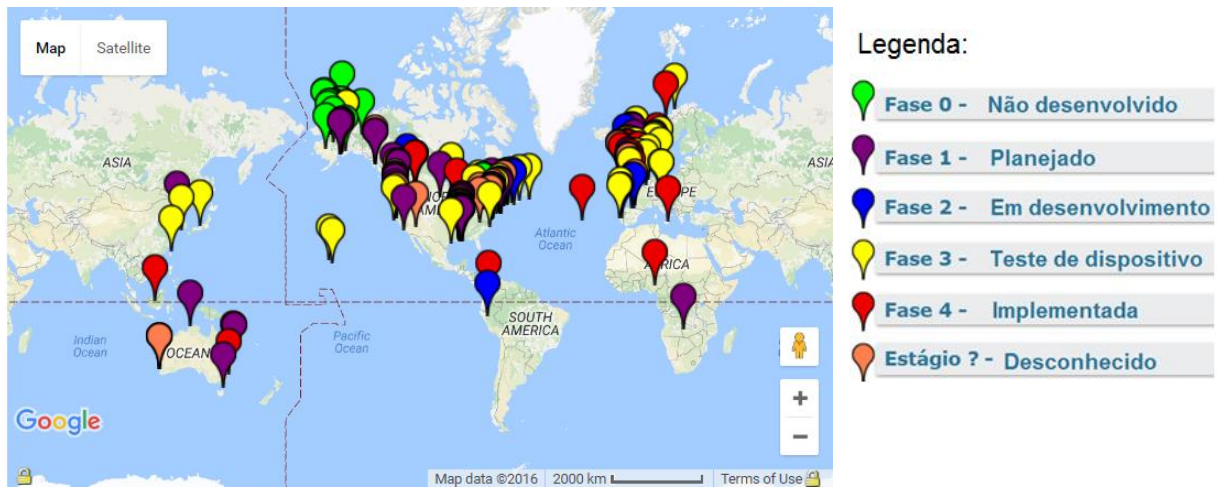


Fonte: BOTAN *et al.*, 2016.

A *Open Energy Information* mantém uma base de dados do Departamento de Energia dos EUA, com informações atualizadas sobre a energia hidrocinética no mundo. A Figura 5, ilustra um mapa com a localização de parques hidrocinéticos, destacando projetos em estudo ou implementado (OPENEI, 2016).

De acordo com a legenda, na Fase 0, os projetos estão em fase de licenciamento, na fase 1, os projetos já receberam a licença ambiental, na fase 2, as empresas responsáveis já iniciaram a preparação do local, na fase 3, os equipamentos foram submetidos a testes, na fase 4, o projeto já foi concluído e está com suas unidades em água, no estágio "?", o progresso do projeto é desconhecido. Observa-se nessa figura que no Brasil não há projetos envolvendo hidrocinética significativos.

Figura 5 - Mapa de Projetos de Tecnologia Marinha e Hidrocinética



Fonte: OPENEI, 2016.

Dentre as vantagens das THCs, está o fato de possuírem custo e tempo de instalação menor que as hidrelétricas, provocando menor impacto ambiental, maior previsibilidade e fator de potência que as eólicas. Quanto às desvantagens, as THCs são mais suscetíveis a corrosão, danos por tempestade e crescimento de algas (CUNHA, 2015).

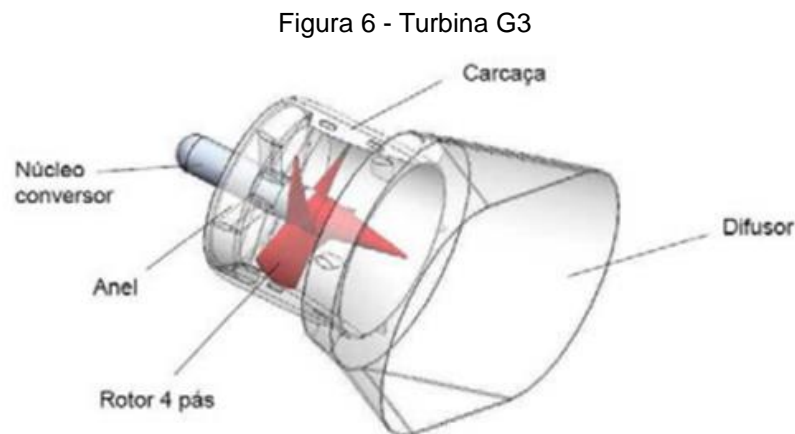
A indicação do melhor local para instalar a THC, leva em conta a topografia e as características do rio, como sua largura, profundidade, velocidade e vazão. Os locais com maior potencial são as regiões de curso d'água com declividades mais acentuadas (FELIZOLA; MAROCCOLO; FONSECA, 2007).

Santos *et al* (2004) projetou, construiu e instalou uma THC axial de pequeno porte, para rios na faixa de velocidade entre 1,33 a 2 m/s e profundidade mínima de 2 m. A turbina é equipada com três pás com diâmetro externo de 1,4 m e proporciona uma potência de 1kW. O mesmo autor verificou que as pás das THCs são menores que as correspondentes usadas em turbinas eólica, para a mesma potência, devido a água possuir uma densidade 835 vezes maior que o ar, o que faz a velocidade do vento de aproximadamente 75 m/s corresponder a velocidade da água de 3 m/s. As THCs por apresentarem baixa velocidade de rotação, em torno de 25 rpm, permite que os peixes circulem livremente entre as pás (SANTOS *et al.*, 2004).

Devido aos projetos de THCs atraírem a atenção de pesquisadores apenas recentemente, a evolução tecnológica desse sistema de obter energia está apenas começando. De acordo com Junior *et al* (2007), a pesquisa sobre THCs na Universidade de Brasília (UnB) iniciou na década de 80 e em 1995 foi instalada em

Correntina-BA a primeira unidade operacional, denominada Geração 1, nos testes realizados em escoamento com velocidade de 2 m/s, foram obtidos a potência de 1,5 kW. Em 2005, com a instalação de um difusor cônico, surgiu a THC Geração 2. Esse difusor proporciona uma desaceleração do escoamento na saída da turbina criando uma região de baixa pressão, aumentando a velocidade do escoamento na entrada e com isso melhorando o rendimento.

A evolução das THCs chegou na Geração 3, a qual apresenta um desempenho melhor que a anterior. Nesse modelo o gerador é integrado ao núcleo da turbina, formando um conjunto com o rotor, como pode ser observado na Figura 6. O gerador é uma máquina assíncrona DC, de 750 W, acoplado a um sistema de multiplicação com engrenagens planetárias (JUNIOR *et al.*, 2007).

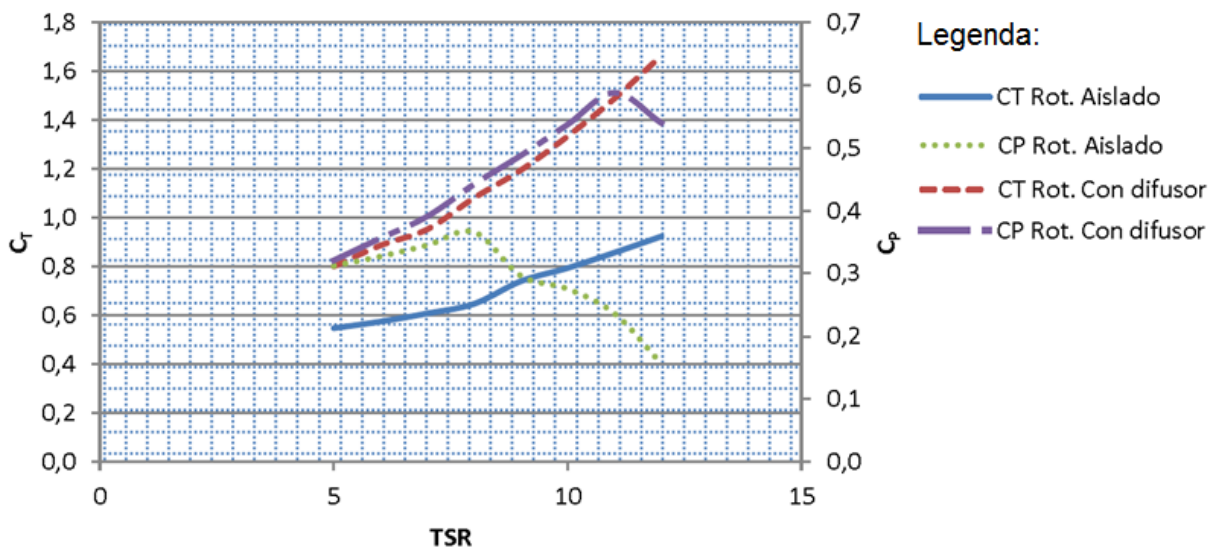


Fonte: JUNIOR *et al.*, 2007

#### 1.4 USO DO DIFUSOR

As turbinas eólicas ou hidrocinéticas, segundo o limite teórico de Betz, não podem converter a energia cinética do vento ou das correntezas em energia mecânica acima de 59,3%. Sob outra perspectiva, Gáes (2015), demonstrou mediante simulação numérica empregando Fluidodinâmica Computacional (CFP), que quando essas turbinas utilizam difusores, o limite de Betz pode ser ultrapassado. Gáes (2015) em seus estudos, conseguiu um aumento de 60,6 % da eficiência em relação a um rotor isolado, quando usando difusor com perfil hidrodinâmico NACA 10510, com inclinação de 15°, conforme ilustra a Figura 7.

Figura 7 - Curva CP x TSR para o difusor anular com perfil NACA 10510



Fonte: GÁES, 2015

## 1.5 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

Em dimensionamento mais detalhado de projetos de PHCs, na definição do local de posicionamento das THCs é necessário que se conheça o perfil da secção transversal do rio.

A batimetria é a medida da profundidade do rio no trecho de interesse. O equipamento molda o relevo do leito do rio, criando um perfil da secção transversal. Em rios de pequeno porte e baixa velocidade, pode ser usado uma régua graduada para medição da profundidade. A medição é feita em intervalos iguais, de uma margem a outra.

Para rios de grande porte, como o Iguaçu e o Paraná, a batimetria pode ser feita com o uso de ecobatimetria. O ecobatímetro é um equipamento que emite um sinal acústico, bate no leito do rio e retorna, um relógio interno mede o intervalo de tempo que o sinal levou para voltar, como a velocidade de propagação do eco é conhecida, obtém-se a profundidade (SANTOS *et al.*, 2001).

## 1.6 VELOCIDADE DO RIO NO TRECHO DE INTERESSE

Para projetos de obtenção de energia elétrica, com o uso de turbinas hidrocinéticas, é fundamental saber a velocidade da corrente do curso d'água. Existem

vários métodos para se determinar essa velocidade, como por exemplo, o molinete hidrométrico, o acústico e o uso de flutuador.

#### 1.6.1 Método do molinete hidrométrico

Nesse método, primeiro determina-se a área da secção transversal do rio, em seguida, com auxílio do molinete hidrométrico, estima-se a velocidade média do fluxo de água.

O molinete hidrométrico é um equipamento que possui uma hélice que fica posicionada na horizontal e de frente para a corrente. Conhecendo o número de voltas da hélice em um intervalo de tempo e usando a equação fornecida pelo fabricante do molinete, estima-se a velocidade média do rio. A quantidade de pontos e locais onde são posicionados o molinete é o que determina a precisão do método. (SANTOS *et al.*, 2001).

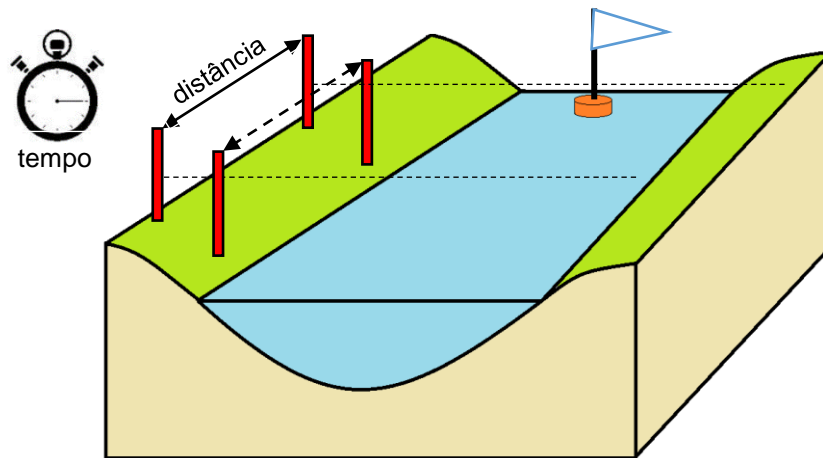
#### 1.6.2 Método Acústico

Para avaliação de velocidade do fluxo da água com maior precisão, utiliza-se o método acústico. A velocidade da corrente é determinada pela análise das ondas acústicas de alta frequência refletidas pelas partículas em suspensão na água. No efeito *doppler* a frequência de propagação da onda se altera, quando se aproxima é alta e quando se afasta é baixa, o cálculo da velocidade é obtido pela mudança dessa frequência. O Perfilador Doppler Acústico de Corrente (ADCP), é um equipamento que utiliza o efeito *doppler* para medir a velocidade de rios (SANTOS *et al.*, 2001).

#### 1.6.3 Método do flutuador

Para determinação da velocidade pelo método do flutuador, utiliza-se os seguintes materiais: quatro balizas, um cronômetro, um flutuador, uma trena e um caiaque, posicionadas conforme mostrado na Figura 8. O procedimento para a medida inicia-se com a escolha do trecho do curso d'água, usando a trena mede-se um intervalo com extensão de no mínimo 10 metros e fixa-se as balizas, em seguida, com a ajuda de um caiaque, solta o flutuador no curso d'água dois metros a montante da primeira baliza e determina-se o tempo que o flutuador leva para percorrer a distância entre as balizas. Essa operação deve ser repetida por no mínimo três vezes, finalmente obtém-se a média da velocidade.

Figura 8 - Determinação da velocidade do rio pelo método do flutuador



Fonte: o autor, 2016

Medida da velocidade:

$$v = \frac{d \left[ \frac{m}{s} \right]}{t} \quad (1)$$

Onde:

$v$  : velocidade [m/s]

$d$  : distância [m]

$t$  : tempo médio [s]

## 1.7 ASPECTOS REGULATÓRIOS

No Brasil não há uma Lei específica que regule os empreendimentos envolvendo Parque Hidrocinético (PHC), então por analogia serão analisadas as legislações referentes às hidrelétricas. A Constituição Federal de 1988, em seu artigo nº 176, parágrafo 4º, dispõe que não dependerá de autorização ou concessão o aproveitamento do potencial de energia renovável de capacidade reduzida. A Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, que estabelece normas para outorga das concessões e permissões de serviços públicos, em seu artigo nº 8, dispõe que o aproveitamento de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 3.000 kW está dispensado de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas ser comunicado ao poder concedente. Essa comunicação é regulamentada pelo artigo 21 da resolução normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização

para implantação de aproveitamentos hidrelétricos nessa faixa de potência.

Para geração de energia elétrica abaixo de 10 MW, o empreendimento deve ainda se adequar a Resolução nº 279, de 27 de junho de 2001, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, condicionando o funcionamento a apresentação de Relatório Ambiental Simplificado (RAS).

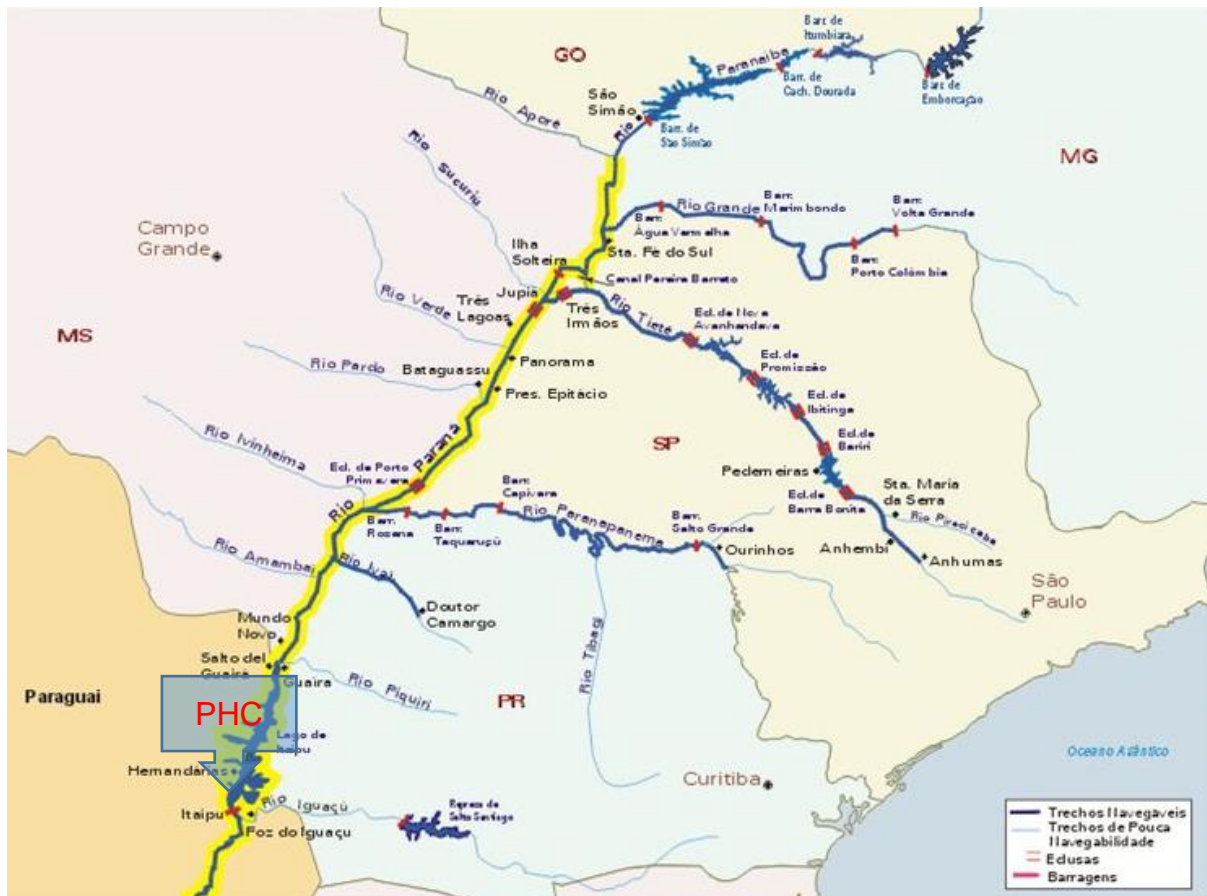
## 1.8 CARACTERÍSTICAS DOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ

O rio Iguaçu é o maior rio do estado do Paraná e um afluente do rio Paraná, formado pelo encontro dos rios Atuba e Iraí na parte leste de Curitiba. O curso do rio segue do Leste para Oeste, serve de divisa entre os estados do Paraná, Santa Catarina e a província de Misiones na Argentina. Esse rio percorre uma extensão de 1.320 km até desaguar no rio Paraná e cobre uma superfície de 72.637,5 km<sup>2</sup>. A vazão média anual desse rio no município de Foz do Iguaçu é de 1.413,50 m<sup>3</sup>/s. A maior cheia foi registrada em julho de 1983, quando o rio apresentou uma vazão de 35.600m<sup>3</sup>/s, a vazão de estiagem foi registrada em 1978, com a vazão de 89,92 m<sup>3</sup>/s. Antes das cataratas, o rio Iguaçu mede 1.200 m de largura, após as suas quedas este rio apresenta 65 m de largura (RIO IGUAÇU, 2016).

O rio Paraná é o segundo maior rio em extensão da América do Sul, nasce na confluência dos rios Grande e Paranaíba. Passa pelos territórios do Brasil, Argentina e Paraguai, na parte alta o rio Paraná separa os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, na parte baixa faz fronteira entre Brasil e Paraguai, ao correr para a região oeste, ele cria uma divisa natural entre a Argentina e o Paraguai, em seu trecho final, ele passa a seguir na direção sul até desaguar no delta do Paraná e no rio da Prata. Os principais afluentes do rio Paraná são: rio Tietê, rio Paranapanema, rio Iguaçu, rio Suruí, rio Verde e rio Pardo. O rio Paraná percorre uma extensão de 4.880 km e sua bacia cobre uma superfície de 2.583.000 km<sup>2</sup>. A vazão média é de 15.900 m<sup>3</sup>/s. A maior cheia ocorreu em junho de 1983, com uma vazão de 33.064 m<sup>3</sup>/s, a vazão de estiagem foi de 6.768 m<sup>3</sup>/s, ocorrida no mês de agosto de 2001 (RIO PARANÁ, 2016). A bacia do Paraná está ilustrada na Figura 9.



Figura 9 - Localização da bacia do Paraná

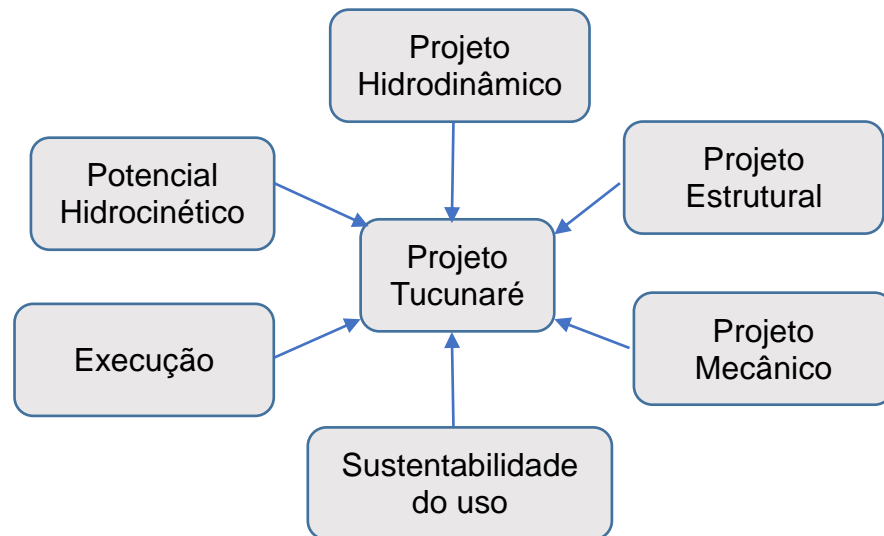


Fonte: PLANTIER, 2013

## 1.9 PROJETO TUCUNARÉ

As Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte) juntamente com a UnB em parceria com a Unicamp, UFPA, UFMG e UNIFEI, desenvolvem um estudo denominado Projeto Tucunaré, que visa introduzir Parques Hidrocinéticos Fluviais no Brasil. Essa parceria rendeu vários trabalhos acadêmicos, tendo em vista aumentar o conhecimento acerca do assunto. A princípio o propósito do estudo é instalar uma unidade demonstrativa de 1 MW, usando duas turbinas de 500 kW, para aproveitamento da energia hídrica residual e já turbinada pela Usina Hidrelétrica de Tucuruí, no rio Tocantins, estado do Pará. As áreas que compõem o Projeto Tucunaré são mostradas na Figura 10.

Figura 10 - Temas que compõem o Projeto Tucunaré



Fonte: VELOSO; CLEMENTE, 2013

### 1.9.1 Características, condições de operação e principais dimensões da THC

No Projeto Tucunaré, a Unidade de Geração Hidrocinética (HTUC) é constituída pela turbina, sistema eletromecânico, nacele, difusor, flutuador e instrumentação de controle e monitoração. A turbina é composta por três pás e hub. O sistema eletromecânico é constituído pela caixa multiplicadora e pelo gerador. A nacele serve para abrigar o sistema eletromecânico e evitar a entrada de água. A função do difusor é induzir uma sucção na sua parte traseira, incrementando a velocidade do escoamento e conseqüentemente a potência. Os flutuadores mantem a turbina estabilizada no rio (SANTA ANA; SILVA, 2014). As características gerais da THC são mostradas na Tabela 1, enquanto as condições de operação prevista para esse projeto são apresentadas na Tabela 2 e por fim, as principais dimensões são exibidas na Tabela 3:

Tabela 1 - Características gerais

<b>CARACTERÍSTICAS GERAIS</b>
<b>Eixo horizontal e fluxo axial</b>
<b>Rotor com três pás</b>
<b>Balsa flutuante ancorada</b>
<b>Gerador submerso</b>
<b>Conjunto transmissão-gerador embarcado na nacele</b>

Fonte: o autor, 2016

Tabela 2 - Condições de operação prevista

<b>GRANDEZA</b>	<b>VALOR PREVISTO</b>
<b>Potência elétrica gerada</b>	500 kW
<b>Tensão elétrica</b>	400 V
<b>Corrente</b>	780 A
<b>Frequência</b>	60 Hz
<b>Velocidade de corrente do rio</b>	1,7 a 2,5 m/s
<b>Rotação nominal da turbina</b>	25 rpm
<b>Rotação máxima da turbina</b>	80 rpm
<b>Rotação do gerador</b>	500 rpm
<b>Razão de multiplicação</b>	20 vezes
<b>Potência nominal</b>	160 kW (1,7 m/s) e 500 kW (2,5 m/s)
<b>Potência máxima</b>	600 kW
<b>Profundidade do rio</b>	20 a 50 m

Fonte: TEIXEIRA, 2014

Tabela 3 - Principais dimensões

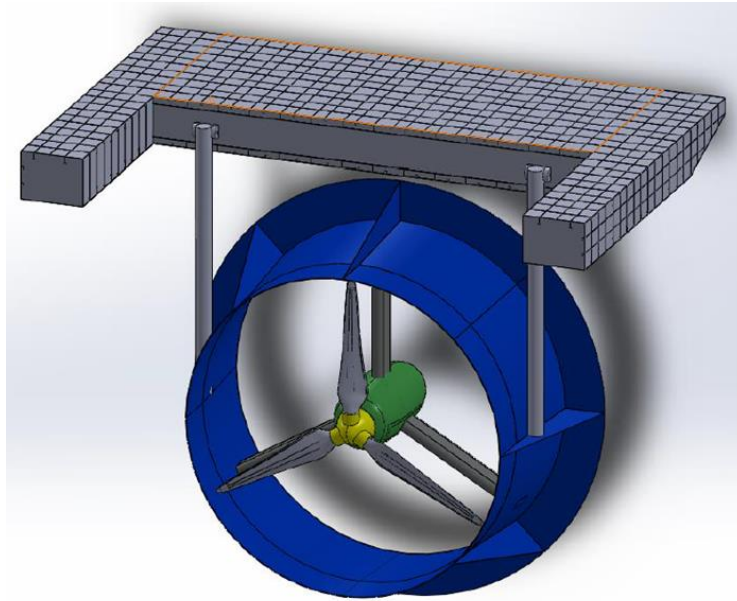
<b>GRANDEZA</b>	<b>VALOR PREVISTO</b>
<b>Diâmetro do rotor</b>	10 m
<b>Diâmetro do cubo do rotor</b>	1,2 m
<b>Diâmetro de entrada do difusor</b>	10,1 m
<b>Diâmetro de saída do difusor</b>	10,64 m
<b>Largura da carenagem da nacele</b>	2 m
<b>Comprimento da carenagem da nacele</b>	4,4 m
<b>Comprimento total</b>	5,3 m
<b>Volume da carenagem da nacele</b>	11,3 m <sup>3</sup>
<b>Volume total externo, sem difusor</b>	12,5 m <sup>3</sup>
<b>Massa total</b>	17.000 kg

Fonte: TEIXEIRA, 2014

### 1.9.2 Partes constituintes da THC

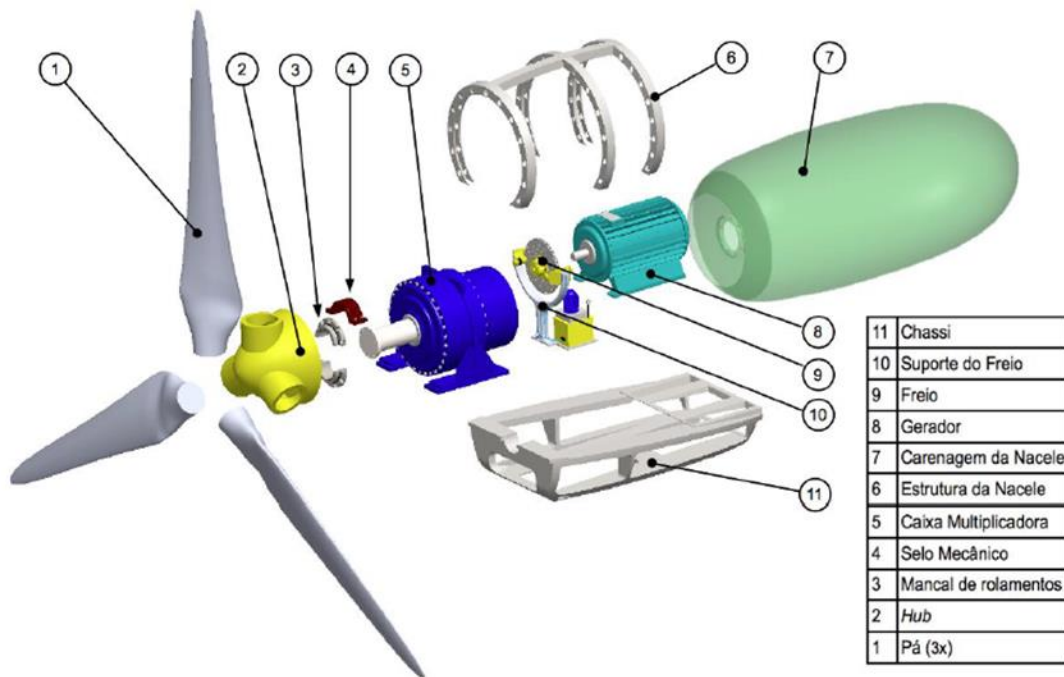
Na Figura 11, a turbina do Projeto Tucunaré é mostrada encaixada no difusor e flutuador, uma visão explodida dos componentes dessa turbina é mostrada na Figura 12 e na Figura 13 é mostrada o projeto de um sistema de flutuação e fundeio para a Turbina Hidrocinética.

Figura 11 - Ilustração da turbina encaixada no difusor e flutuador



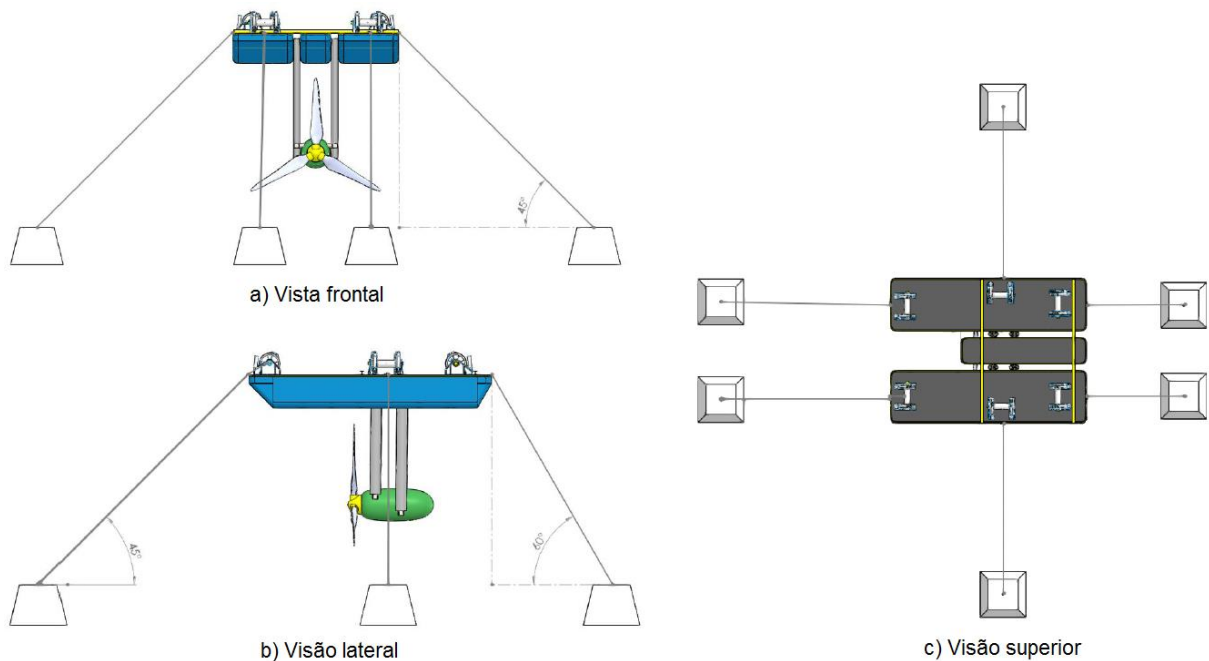
Fonte: CUNHA, 2015

Figura 12 - Vista explodida dos componentes da THC



Fonte: FONSECA; ARAUJO, 2013

Figura 13 - Sistema de flutuação e fundeio para a THC



Fonte: OLIVEIRA; SILVA, 2015

## 1.10 OBJETIVO

### 1.10.1 Objetivo geral

Relacionar os pontos que influenciam na prospecção de um Parque Hidrocinético através da análise comparativa de diferentes locais para sua instalação.

### 1.10.2 Objetivos específicos

- Escolha do trecho para instalação do PHC;
- Verificar se o local atende aos requisitos de largura e profundidade;
- Coletar os dados da vazão e velocidade do curso da água;
- Comparar a energia produzida nos dois locais;
- Decidir qual é o melhor local para instalação do PHC.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para elaboração deste trabalho inicialmente foi realizado uma pesquisa documental, no qual foram analisados vários trabalhos acadêmicos, artigos científicos e a legislação, o que proporcionou uma fundamentação teórica e um conhecimento mais aprofundado sobre o assunto.

A pesquisa sobre Turbinas Hidrocinéticas levou ao conhecimento do Projeto Tucunaré. A escolha por este projeto para servir de base para o dimensionamento de um Parque Hidrocinético, deve-se ao fato das pesquisas sobre o assunto estarem bastante amadurecido e já ser possível efetivamente colocar em prática.

O próximo passo foi a escolha do trecho do rio com as condições para implantação do sistema hidrocinético, para isso foi realizado uma análise usando o Google Earth, no qual foi considerado como critério, o trecho do rio com menor largura.

O levantamento de dados de vazão foi obtido de estações fluviométricas, através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA), que possibilitou a caracterização do regime hidrológico ao longo do ano. Por fim foi realizado a estimativa do potencial hidrocinético e a estimativa da energia anual gerada.

### 2.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA

O Parque Nacional do Iguaçu (PNI), onde está inserido as Cataratas do Iguaçu, é uma Unidade de Conservação e Patrimônio Natural da Humanidade, reconhecido pela Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura (UNESCO), a sua gestão está sob responsabilidade do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Possui área total de 1.697 km<sup>2</sup>, está situado no sudoeste do estado do Paraná, sendo limitado ao norte pela rodovia BR-277, a leste pelo rio Gonçalves Dias, ao sul pelo rio Iguaçu e a oeste pelo rio São João. O rio Iguaçu é o maior rio do estado do Paraná e um afluente do rio Paraná, o trecho entre as Cataratas e a foz com o rio Paraná possui um comprimento de 23 km e uma largura média de 200 m (IBAMA, 1999).

Foi escolhido o posto fluviométrico Salto Cataratas (Código ANA 65993000) no rio Iguaçu, Foz do Iguaçu, Paraná, para servir de base para a obtenção da série

de vazões utilizadas para dimensionamento do PHC, a Tabela 4 mostra os dados do posto.

Tabela 4 - Dados da Estação fluviométrica Salto Cataratas

<b>ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA SALTO CATARATAS</b>	
<b>Código Estação Fluviométrica</b>	65993000
<b>Nome da Estação</b>	SALTO CATARATAS
<b>Entidade Responsável</b>	COPEL
<b>Unidade da Federação</b>	PARANÁ
<b>Município</b>	FOZ DO IGUAÇU
<b>Bacia Hidrográfica</b>	RIO PARANÁ
<b>Nome do Rio</b>	RIO IGUAÇU
<b>Área de Drenagem</b>	67.100 km <sup>2</sup>

Fonte: BRASÍLIA, 2016

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é um empreendimento binacional administrada pelo Brasil e Paraguai, localizada no rio Paraná na fronteira entre os dois países. O seu lago possui uma área de 1.350 km<sup>2</sup>, indo de Foz do Iguaçu até Guaíra, 150 km ao norte. A capacidade instalada de geração da usina é de 14.000 MW, com 20 unidades geradoras fornecendo 700 MW cada. As turbinas são do tipo Francis, com potência nominal de 715 MW e vazão nominal de 690 m<sup>3</sup>/s (ITAIPU, 2016). O trecho do rio Paraná entre a Itaipu e a confluência com o rio Iguaçu possui um comprimento de 20 km e uma largura média de 500 m.

Foi escolhido o posto fluviométrico Itaipu R-2 (Código ANA 64903000) no rio Paraná, Foz do Iguaçu, Paraná, para servir de base para a obtenção da série de vazões utilizadas para dimensionamento do PHC, a Tabela 5 mostra os dados do posto.

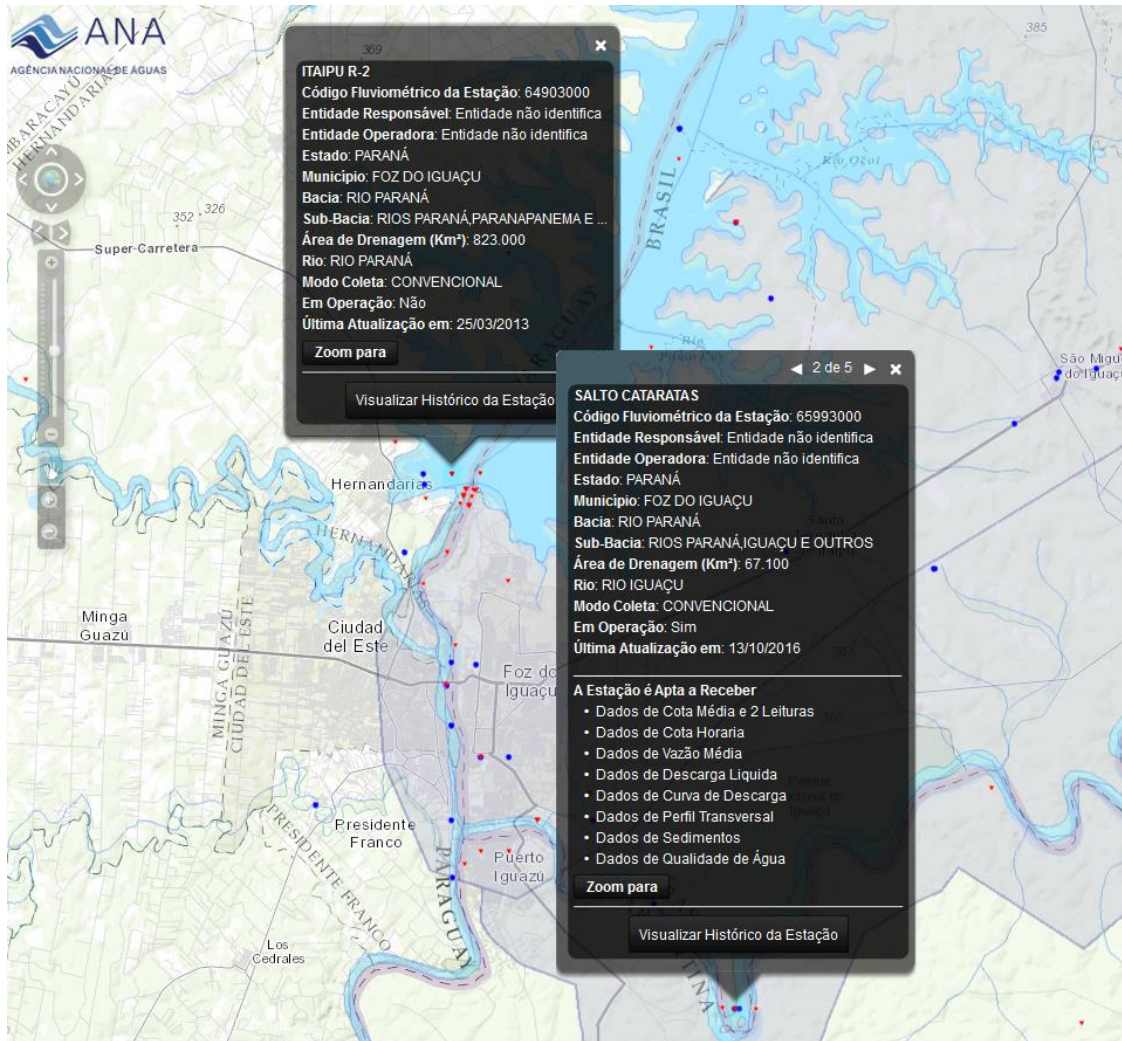
Tabela 5 - Dados da Estação fluviométrica Itaipu R-2

<b>ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA ITAIPU R-2</b>	
<b>Código Estação Fluviométrica</b>	64903000
<b>Nome da Estação</b>	ITAIPU R-2
<b>Entidade Responsável</b>	ITAIPU
<b>Unidade da Federação</b>	PARANÁ
<b>Município</b>	FOZ DO IGUAÇU
<b>Bacia Hidrográfica</b>	RIO PARANÁ
<b>Nome do Rio</b>	RIO PARANÁ
<b>Área de Drenagem</b>	823.000 km <sup>2</sup>

Fonte: BRASÍLIA, 2016

A localização desses postos fluviométricos foi escolhida pela excelente cobertura e representatividade do local. Uma imagem da localização dos postos fluviométricos é ilustrada na Figura 14.

Figura 14 - Localização dos postos fluviométricos



Fonte: BRASÍLIA, 2016

## 2.2 ESCOLHA DO LOCAL

Diferente das hidrelétricas ou eólicas que estão com suas tecnologias amadurecidas, as THC's estão ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento. No projeto de hidrelétricas e eólicas são especificadas configurações de acordo com o perfil do rio ou do vento e então adquirido os equipamentos apropriados, no caso das Hidrocinéticas não há no mercado turbinas com diferentes arranjos, necessitando um desenho específico para cada iniciativa de construir um PHC. Nesse ponto observa-



se a importância do Projeto Tucunaré, onde todos os detalhes técnicos de uma turbina já foram dimensionados, havendo só o inconveniente de já estar definido a potência elétrica fornecida, que é de 500 kW.

De acordo com as características, condições de operação e dimensões da THC dimensionada para o Projeto Tucunaré, deve-se escolher um trecho no leito do rio onde obtém-se o melhor rendimento para instalar as turbinas. O local deve possuir escoamento fluvial (subcrítico), ter largura acima de 50 metros, profundidade entre 20 e 50 metros e velocidade de corrente entre 1 e 3 m/s.

A definição do local foi realizada com ajuda do aplicativo Google Earth. No qual foi analisado vários locais em potencial para posicionar o PHC, sendo definido para o rio Iguazu o ponto nas coordenadas de latitude  $25^{\circ}36'58.98''S$  e longitude  $54^{\circ}29'44.07''O$  e para o rio Paraná o ponto nas coordenadas de latitude  $25^{\circ}32'37.81''S$  e longitude  $54^{\circ}35'37.12''O$ , por apresentarem largura menor que o restante do rio no trecho de interesse. Os locais onde ficarão dispostos os PHCs é apresentado na Figura 15.

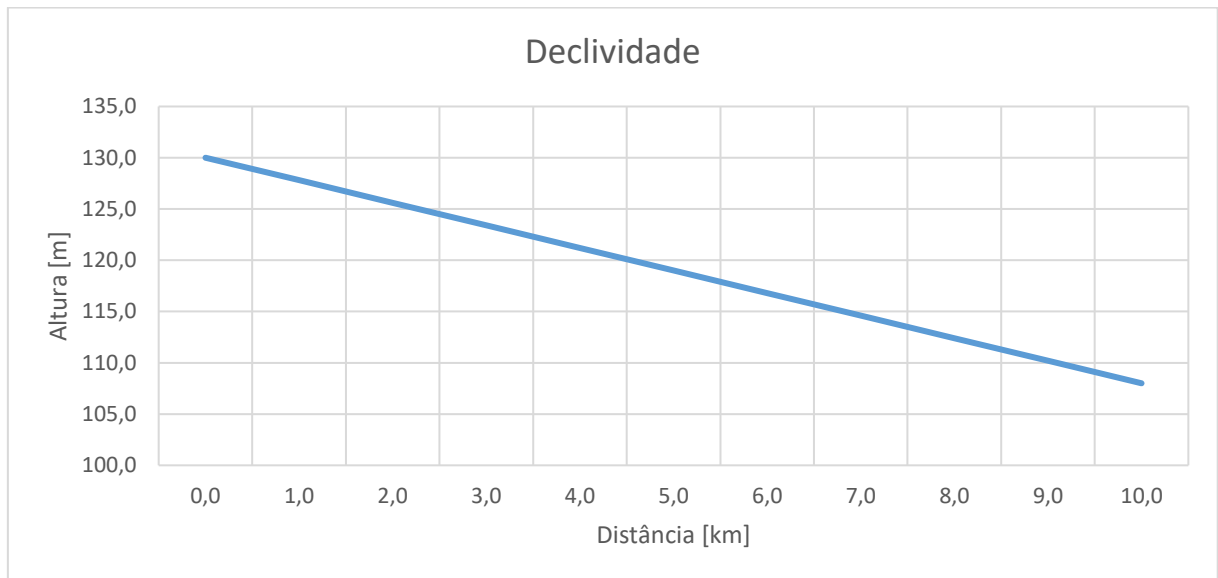
Figura 15 - Locais propostos para instalação dos PHCs



Fonte: Google Earth

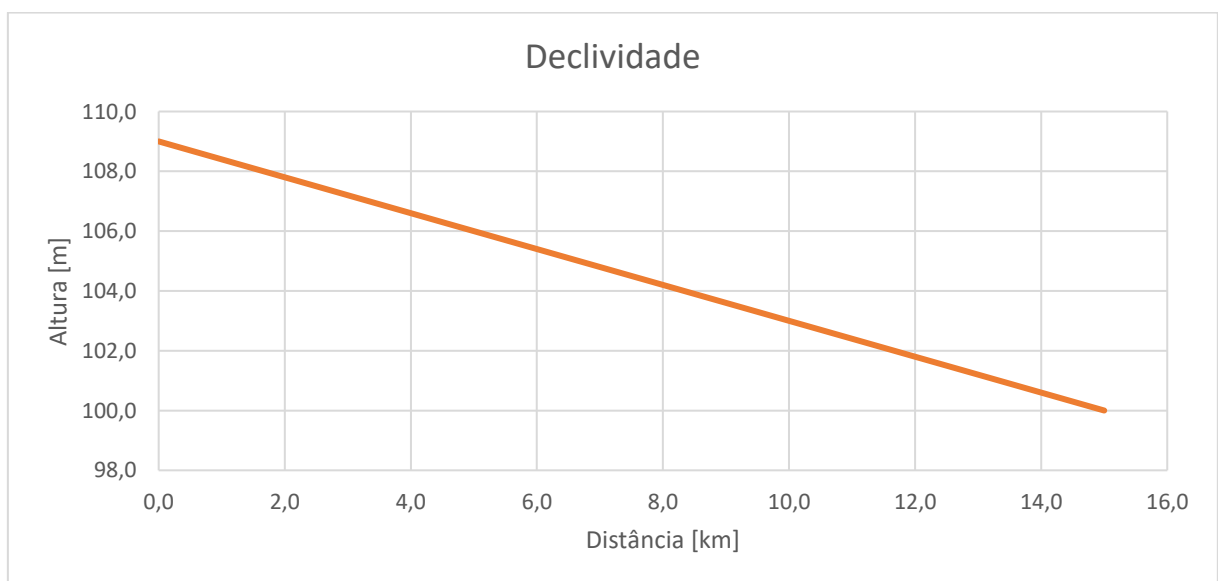
No Google Earth foi efetuado um corte longitudinal entre as Cataratas e o local proposto para instalação do PHC no rio Iguaçu, para obtenção da declividade, conforme mostrado na Figura 16. Pelo mesmo motivo foi efetuado um corte longitudinal entre a Itaipu e o local proposto para instalação do PHC no rio Paraná, mostrado na Figura 17.

Figura 16 - Declividade no local para instalação do PHC no rio Iguaçu



Fonte: o autor, 2016

Figura 17 - Declividade no local para instalação do PHC no rio Paraná



Fonte: o autor, 2016

Para o cálculo da declividade foi usado a seguinte equação:

$$S = \frac{h \left[ \frac{m}{m} \right]}{d \left[ \frac{m}{m} \right]} \quad (2)$$

Onde:

$S$  : Declividade

$d$  : Distância

$h$  : Altura

Para o PHC no rio Iguaçu fica:

$$S = \frac{130 - 110}{9290} = 0,00215 \left[ \frac{m}{m} \right]$$

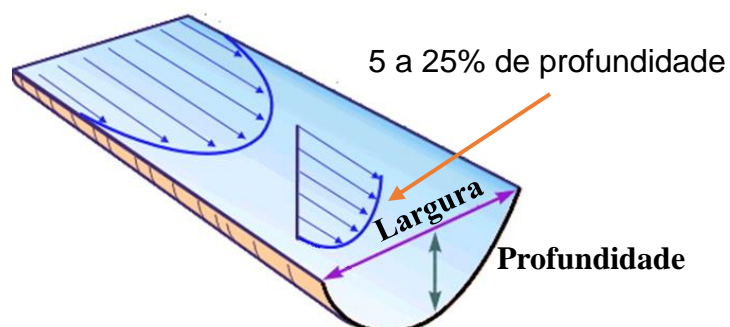
E para o PHC no rio Paraná fica:

$$S = \frac{109 - 100}{15000} = 0,0006 \left[ \frac{m}{m} \right]$$

O trecho escolhido é o que apresenta mais adequado do ponto de vista energético, pois possui uma boa disponibilidade hídrica e declividade do perfil longitudinal necessária.

A profundidade ideal para instalação das THC's é entre 5 a 25 por cento da superfície em relação ao fundo do leito do rio, local onde ocorre a velocidade máxima, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Perfil de velocidade de um rio



Fonte: BORMA; RENNÓ, 2016

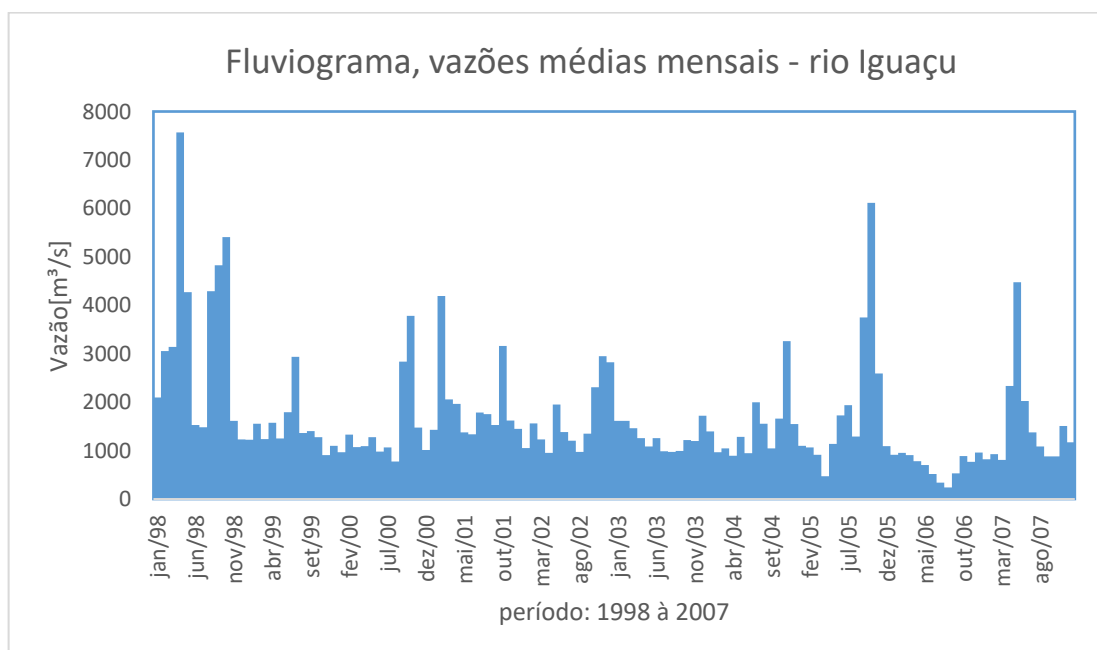
## 2.3 FLUVIOGRAMA

Com as informações das estações fluviométricas, foram obtidos os dados das vazões para o rio Iguaçu no período entre janeiro de 1998 a dezembro de 2007 e para o rio Paraná no período entre janeiro de 2003 a dezembro de 2012, as quais são apresentadas nas Tabelas A.1 e A.2 (APÊNDICE A).

Para o rio Iguaçu, no período em estudo, a maior vazão foi em abril de 1998 com 7.570 m<sup>3</sup>/s e a menor vazão foi em agosto de 2006 com 237 m<sup>3</sup>/s, uma diferença de 32 vezes. Para o rio Paraná, no período em estudo, a maior vazão foi em janeiro de 2010 com 22.410 m<sup>3</sup>/s e a menor vazão foi em setembro de 2005 com 8.858,1 m<sup>3</sup>/s, uma diferença de 2,5 vezes. As representações gráficas das vazões durante o período são mostradas nos Gráfico 1 e 2.

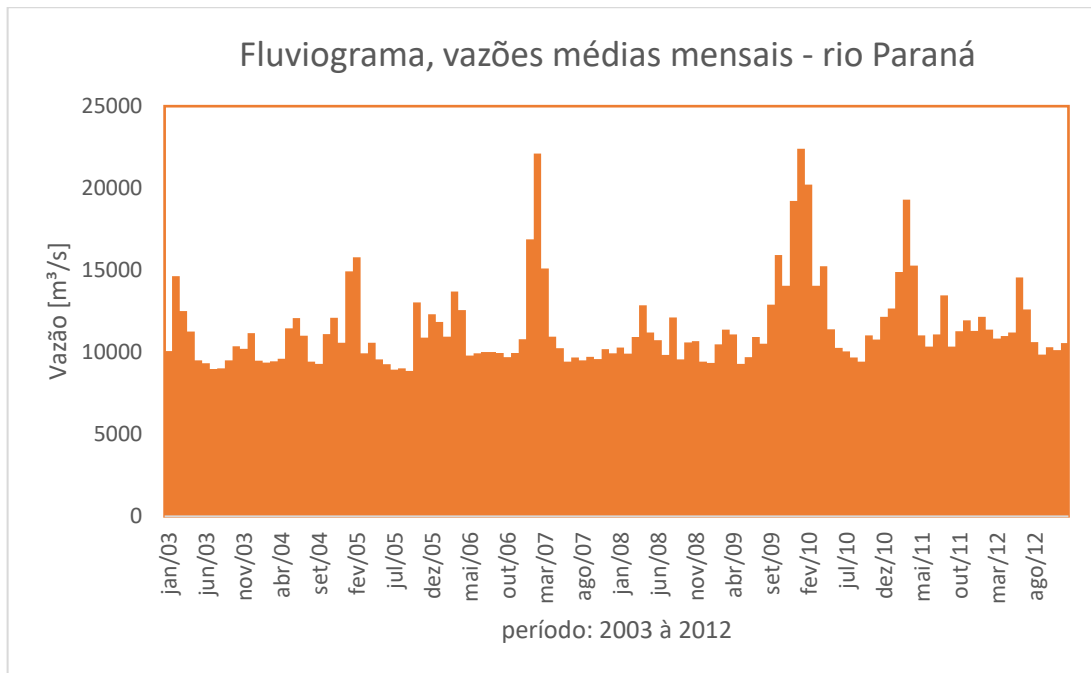
No período analisado verifica-se que para o rio Iguaçu a máxima vazão média mensal ocorreu em abril de 1998, quando atingiu a vazão de 7.570 m<sup>3</sup>/s, a mínima vazão média ocorreu em agosto de 2006, no valor de 237 m<sup>3</sup>/s e a vazão média ficou em 1.684 m<sup>3</sup>/s para o período. No caso do rio Paraná a máxima vazão média mensal ocorreu em janeiro de 2010, quando atingiu 22.410 m<sup>3</sup>/s, a mínima vazão média ocorreu em setembro de 2005, no valor de 8.858 m<sup>3</sup>/s e a vazão média ficou em 11.460 m<sup>3</sup>/s para o período.

Gráfico 1 - Fluviograma, vazões médias mensais no rio Iguaçu



Fonte: o autor, 2016

Gráfico 2 - Fluviograma, vazões médias mensais no rio Paraná



Fonte: o autor, 2016

## 2.4 CURVA DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES

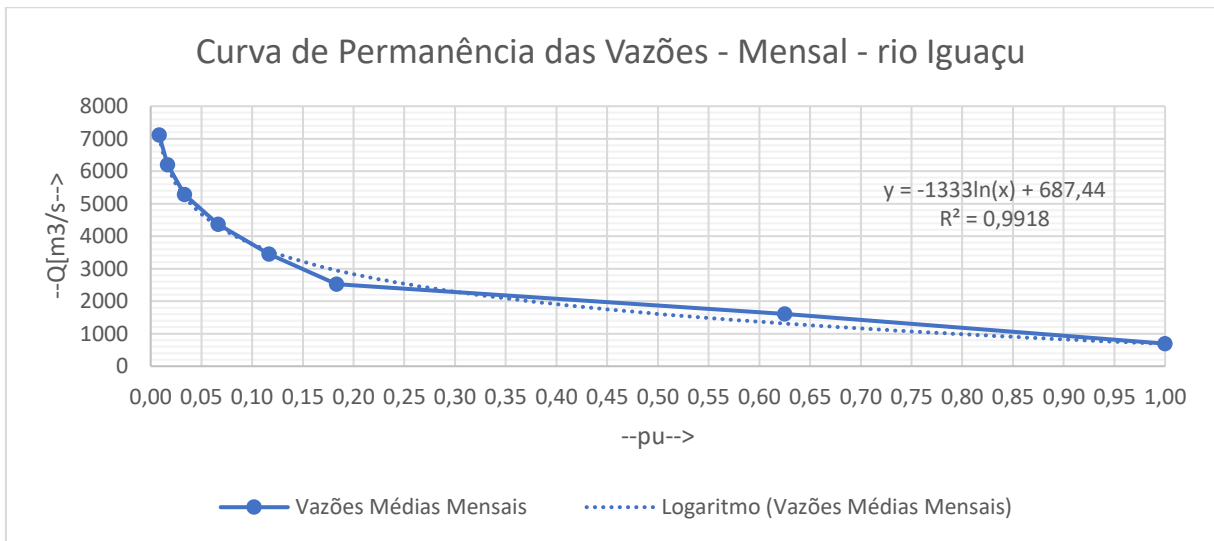
A curva de permanência é utilizada para analisar o comportamento de cada vazão, indicando a probabilidade de ocorrerem vazões iguais ou superiores. Para o rio Iguaçu, é mostrado na Tabela A.3 (APÊNDICE A) a frequência mensal, relativa e acumulada e no Gráfico 3 a curva de permanência das médias mensais das vazões para o período de 1998 a 2007.

Usando a equação sugerida na linha de tendência da planilha do Microsoft Office Excel, obtém-se a vazão firme  $Q_{95}$ , no valor de  $756 \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde a probabilidade dessa vazão ocorrer com igual valor ou superior em 95 % do tempo.

$$y = -1.333 * \ln(x) + 687,44 = -1.333 * \ln(0,95) + 687,44 = 756 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3)$$

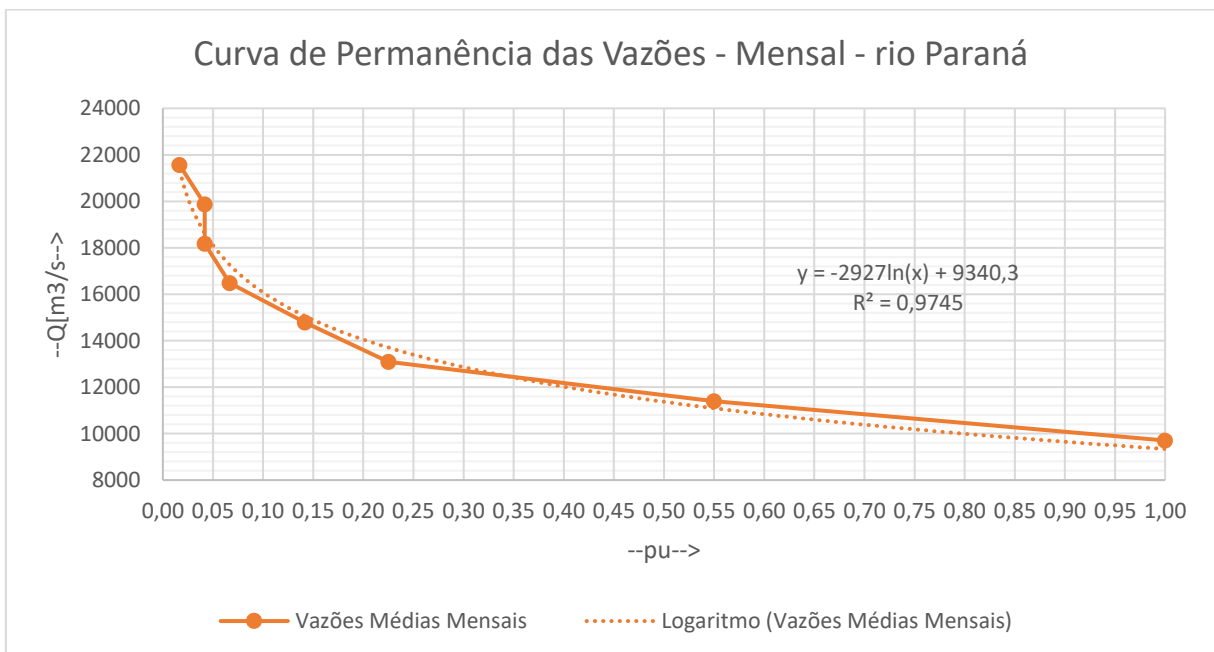
Para o rio Paraná, é mostrado na Tabela A.4 (APÊNDICE A) a frequência mensal, relativa e acumulada e no Gráfico 4 a curva de permanência das médias mensais das vazões para o período de 2003 a 2012.

Gráfico 3 - Traçado da curva de permanência para vazões médias no rio Iguazu



Fonte: o autor, 2016

Gráfico 4 - Traçado das curvas de permanência para vazões médias no rio Paraná



Fonte: o autor, 2016

Usando a equação sugerida na linha de tendência da planilha do Microsoft Office Excel, obtém-se a vazão firme  $Q_{95}$ , no valor de 9.490,44  $m^3/s$ , que corresponde a probabilidade dessa vazão ocorrer com igual valor ou superior em 95 por cento do tempo.

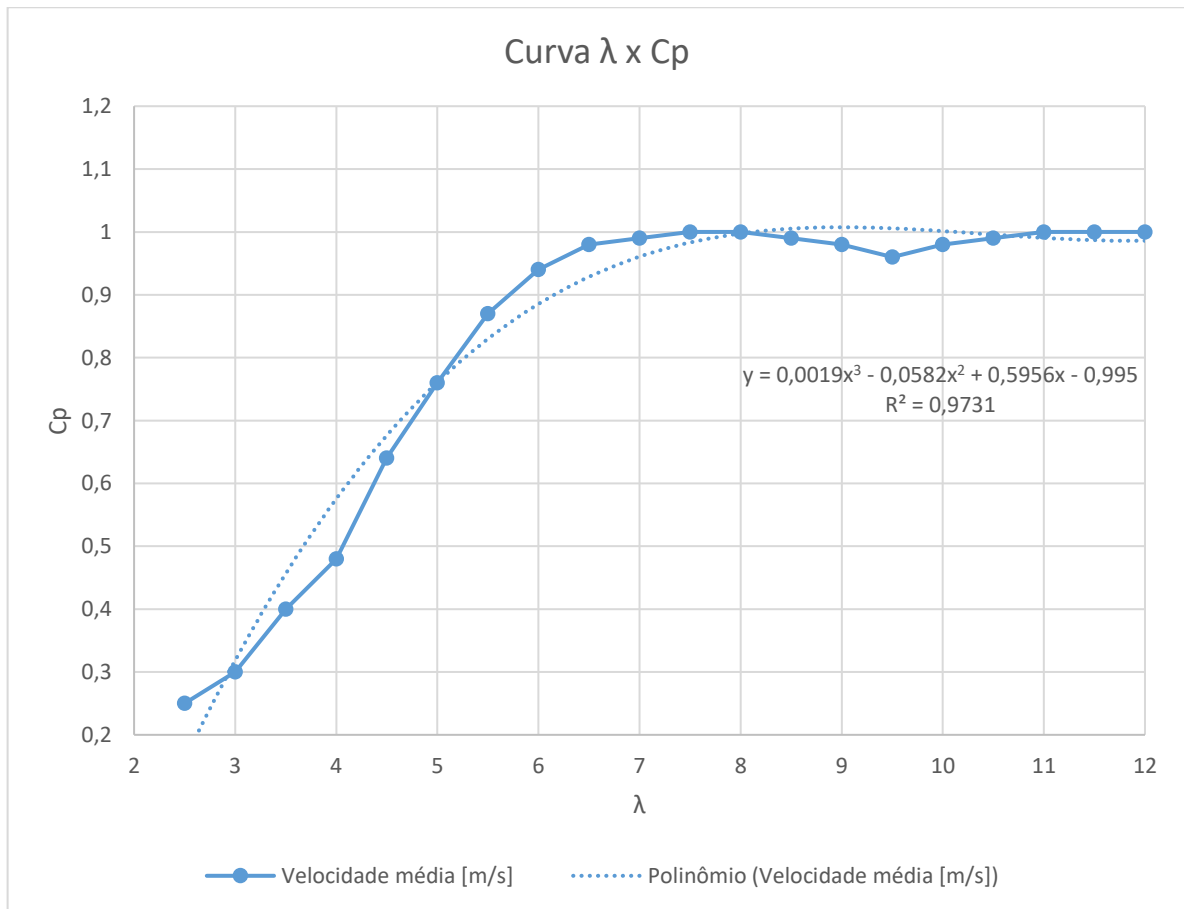
$$y = -2.927 * \ln(x) + 9340,3 = -2.927 * \ln(0,95) + 9.340,3 = 9.490,44 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

Comparando as curvas de permanência de vazões dos dois rios, observamos que a vazão média do rio Paraná é cerca de 12 vezes maior que do rio Iguaçu, conseqüentemente com maior capacidade de fornecer energia.

## 2.5 CURVA $C_P$ x $\lambda$ PARA O PERFIL HIDRODINÂMICO ag04

Numa análise de desempenho entre 20 perfis aerodinâmicos de rotores normalmente utilizadas em turbinas eólicas e hidrocínéticas, Veloso e Clemente (2013) usando como critério a curva  $C_P$  x  $\lambda$  (Coeficiente de Potência versus Razão de velocidade na ponta da pá), selecionaram o perfil ag04 como sendo o que apresentou o melhor desempenho com o difusor, com o valor de  $C_P$  igual a 0,9218 para a rotação de 28 rpm, obtendo a potência de 565 kW. A curva  $C_P$  x  $\lambda$  para o perfil ag04 operando com difusor é ilustrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Curva  $C_P$  x  $\lambda$  para o perfil ag04 operando com difusor (adimensional)



Fonte: VELOSO; CLEMENTE, 2013

O Coeficiente de Potência ( $C_P$ ) é a razão entre a potência extraída da turbina pela potência total contida na massa de água em movimento. Para o  $C_P$ , o limite máximo teórico de Betz é 0,593, no entanto, no Projeto Tucunaré o conjunto gerador hidrocínético é equipado com um difusor e pás com perfil hidrodinâmico “ag04”, que aumenta o Coeficiente de Potência acima do limite de Betz, no valor de 0,9218 (VELOSO; CLEMENTE, 2013), conseqüentemente aumentando a eficiência.

## 2.6 POTENCIAL ENERGÉTICO HIDROCINÉTICO

A energia cinética de uma massa de fluido em movimento a uma determinada velocidade é dada pela equação (PICOLO; RÜHLER; RAMPINELLI, 2014):

$$E_C = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (5)$$

Tomando as seguintes igualdades:

$$m = \rho * V \quad (6)$$

$$V = A * d \quad (7)$$

$$d = v * t \quad (8)$$

Onde:

$E_C$  : Energia cinética [J]

$m$  : massa [kg]

$\rho$  : massa específica [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  : volume [m<sup>3</sup>]

$A$  : área [m<sup>2</sup>]

$d$  : distância [m]

$v$  : velocidade [m/s]

$t$  : tempo [s]

Obtemos:

$$E = \frac{1}{2} * \rho * A * v * t * v^2 \quad (9)$$



Com base nesta equação, a potência hidrocínética disponível em um trecho transversal ao fluxo de água de um rio é obtido pela equação:

$$P_{hc} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 [W] \quad (10)$$

Onde:

$P_{hc}$  : potência hidrocínética disponível [W]

$\rho$  : massa específica da água, igual a 998 [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  ; área frontal do rotor [m<sup>2</sup>]

$v$  : velocidade média do curso d'água [m/s]

A obtenção da área a partir do diâmetro do rotor da turbina é conseguida com a Equação 11:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} [m^2] \quad (11)$$

Onde:

$D$  : diâmetro do rotor [m]

A equação da potência hidrocínética então fica:

$$P_{hc} = \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * v^3 [W] \quad (12)$$

Aplicando o Coeficiente de Potência ( $C_P$ ) a equação fica:

$$P_{hc} = C_P * \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * v^3 [W] \quad (13)$$

Atribuindo o Rendimento Geral ( $\eta_g$ ) do conjunto mecânico e elétrico obtém-se a Potência Elétrica:

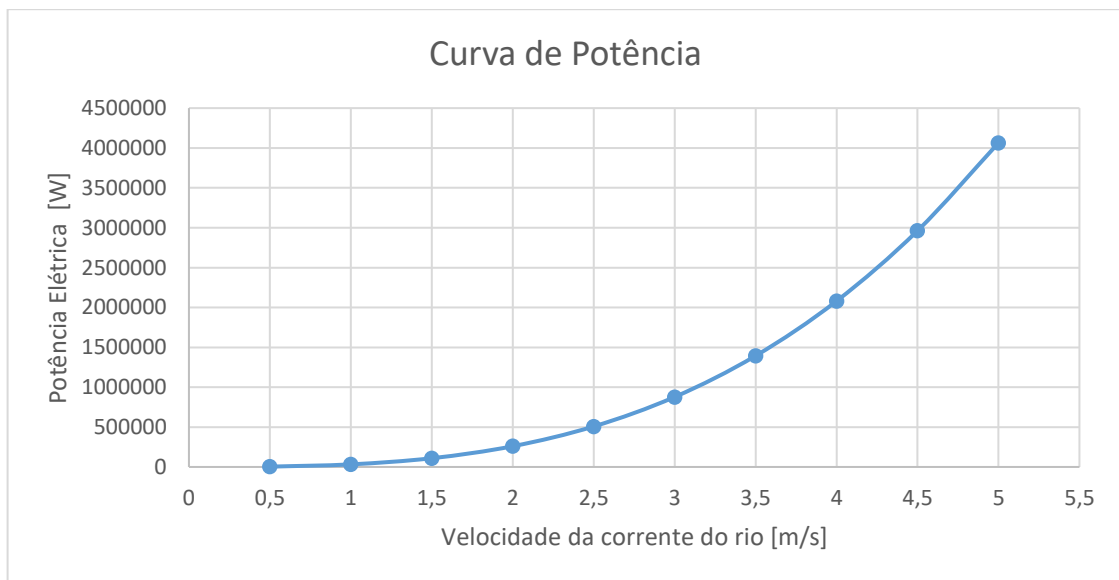
$$P_{el} = \eta_g * C_P * \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * v^3 [W] \quad (14)$$

## 2.7 CURVA DE POTÊNCIA

Para determinar a curva de potência da THC, baseada na Potência Elétrica e na velocidade da corrente do rio, tem-se que primeiro definir valores para a Potência Elétrica. Usando a Equação 14 para uma faixa de velocidade entre 0,5 e 5 m/s, obtém potências que variam de 4,06 a 4.064,24 kW.

Após a realização dos cálculos os resultados foram inseridos na Tabela A.5 (APÊNDICE A). A Curva de Potência é então obtida, conforme mostra o Gráfico 6.

Gráfico 6 - Curva de Potência



Fonte: o autor, 2016

No gráfico a linha de tendência demonstra que a potência aumenta a uma taxa exponencial de terceira ordem em relação a velocidade da corrente do rio, mostrando que pequeno aumento na velocidade do rio há um grande ganho de potência.

## 2.8 ÁREA HIDRÁULICA

A área hidráulica, necessária para estimar a velocidade do rio em qualquer altura de cota, é determinada através do cálculo de polígonos irregulares pelo método do Produto em Cruz (ROMERO, 2012), conforme equação abaixo:

$$A = \frac{1}{2} * \{ [\sum_{i=1}^{n-1} ((x_i * y_{i+1}) - (y_i * x_{i+1}))] + [(x_n * y_1) - (y_n * x_1)] \} [m^2] \quad (15)$$

Onde:

$A$  : área do polígono irregular [ $m^2$ ]

$x$  e  $y$  : coordenadas dos vértices do polígono

## 2.9 FATOR DE CAPACIDADE

O Fator de Capacidade (FC) mede em termos de porcentagem a razão entre a energia produzida e a energia teórica, gerada considerando a potência nominal do hidrogerador. É também um importante critério de verificação da viabilidade técnica e econômica do PHC. O cálculo do FC, considerando o período de 1 ano, usa a seguinte equação:

$$FC = \frac{EAG}{\Delta t * P_n} \quad (16)$$

Onde:

$FC$  = Fator de capacidade

$EAG$  = Energia anual gerada [MWh/ano]

$\Delta t$  = 24h \* 365 dias = 8760 [h]

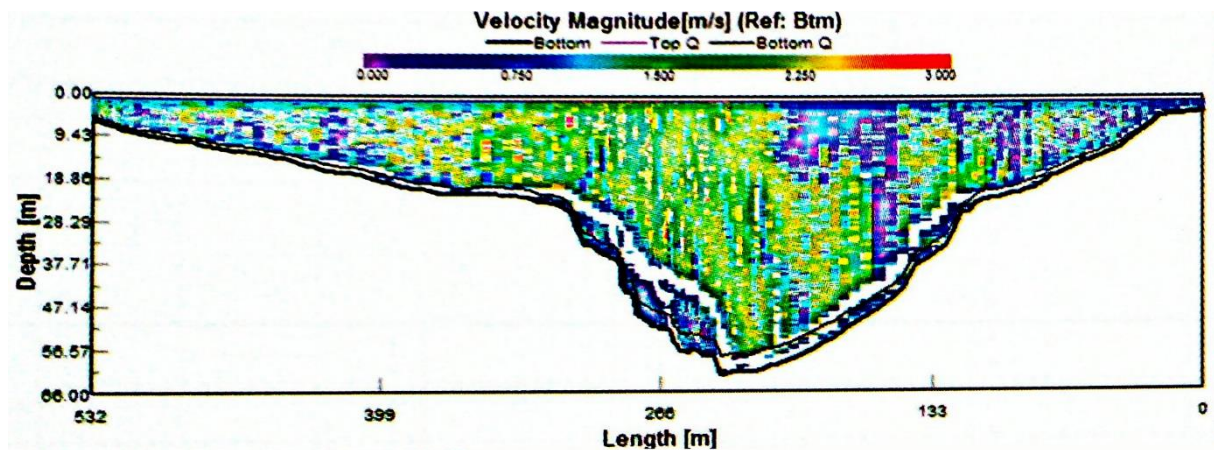
$P_n$  = Potência nominal do PHC = (2 \* 500 kW)/1000 = 1 [MWh]

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 SECÇÃO TRANSVERSAL DO RIO

Para saber a velocidade média da correnteza de um rio, é necessário conhecer a vazão e a área da secção transversal desse rio. Na seção 2.3, foi obtido a vazões médias mensais através do fluviograma, nesta seção será conhecido o valor da área. A secção transversal do rio Iguaçu foi obtida com dados fornecidos pela Itaipu Binacional (OPSH.DT, 2016), enquanto que a secção transversal do rio Paraná, foi obtido de Gamaro (2012), conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube



Fonte: GAMARO, 2012

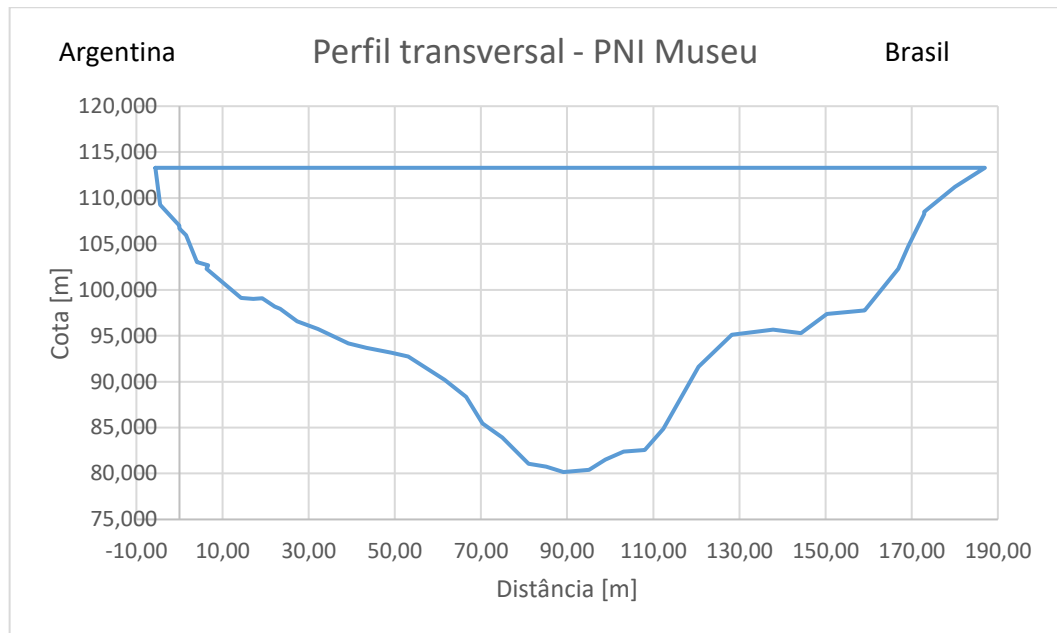
Com base no perfil transversal dos rios Iguaçu e Paraná, foram montadas as Tabelas 6 e 7. A partir desses dados foram traçadas as linhas de tendência e as respectivas equações para largura, perímetro e área, as quais são utilizadas para o cálculo da energia produzida pela THC. Os perfis transversais gerados pela planilha do Microsoft Office Excel são mostrados nos Gráficos 7 e 12, as curvas Vazão versus Altura, Largura, Área e Perímetro são mostradas nos Gráficos 8, 9, 10 e 11 para o rio Iguaçu e nos Gráficos 13, 14, 15 e 16 para o rio Paraná.

Tabela 6 - Dados do perfil transversal do rio Iguaçu no posto fluviométrico PNI Museu

Perfil transversal - PNI - Museu								
Distância [m]	Cota [m]	Profundidade [m]	Largura [m]	Segmento [m]	Perímetro [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Velocidade [m/s]
-5,6	113,288	33,13	192,59	0	212,02	3651,35	5143,47	1,41
-4,52	109,248	29,09	184,53	4,18	204,74	2903,43	3102,86	1,07
0	107,008	26,85	172,91	5,04	192,96	2508,39	2344,56	0,93
0	106,678	26,52	172,91	0,33	187,67	2454,29	2249,74	0,92
1,5	105,968	25,81	167,66	1,66	182,21	2329,7	2058,54	0,88
4,04	103,008	22,85	162,82	3,9	177,2	1837,06	1421,48	0,77
6,67	102,659	22,5	152,4	2,65	164,27	1741,42	1360,75	0,78
6,31	102,308	22,15	143,97	0,5	152,82	1653,13	1302,3	0,79
14,33	99,128	18,97	129,99	8,63	146	1193,73	874,86	0,73
17,1	99,008	18,85	120,75	2,77	130,9	1151,84	861,83	0,75
19,2	99,068	18,91	109,05	2,1	118,51	1124,28	868,32	0,77
22,1	98,188	18,03	98,39	3,03	107,91	980,97	777,8	0,79
23,4	97,928	17,77	88,96	1,33	94,3	875,05	752,91	0,86
27,32	96,558	16,4	80,68	4,15	88,04	694,24	634,32	0,91
32,18	95,728	15,57	70,95	4,93	79,01	570,28	571,76	1
39,18	94,158	14	59,67	7,17	69,71	416,85	469,81	1,13
43,41	93,698	13,54	51,68	4,25	58,62	326,62	443,53	1,36
49,14	93,158	13	40	5,76	48,41	236,93	414,56	1,75
53,08	92,728	12,57	32,02	3,96	38,57	172,85	392,85	2,27
61,57	90,188	10,03	19,45	8,86	30,51	61,24	285,91	4,67
66,59	88,358	8,2	8,37	5,34	14,95	12,22	227,41	18,61
70,38	85,438	5,28	0	4,78				
74,96	83,928	3,77		4,82				
81,02	81,068	0,91		6,7				
85,1	80,758	0,6		4,09				
89,14	80,158	0		4,08				
95,09	80,388	0,23		5,95				
98,85	81,498	1,34		3,92				
103,13	82,388	2,23		4,37				
108	82,558	2,4		4,87				
112,36	84,868	4,71		4,93				
120,49	91,638	11,48		10,58				
128,25	95,098	14,94		8,5				
137,85	95,668	15,51		9,62				
144,32	95,298	15,14		6,48				
150,28	97,388	17,23		6,32				
159,07	97,758	17,6		8,8				
166,86	102,308	22,15		9,02				
169,16	104,748	24,59		3,35				
172,91	108,258	28,1		5,14				
172,91	108,498	28,34		0,24				
180,01	111,218	31,06		7,6				
186,99	113,288	33,13		7,28				
-5,6	113,288	33,13		0				

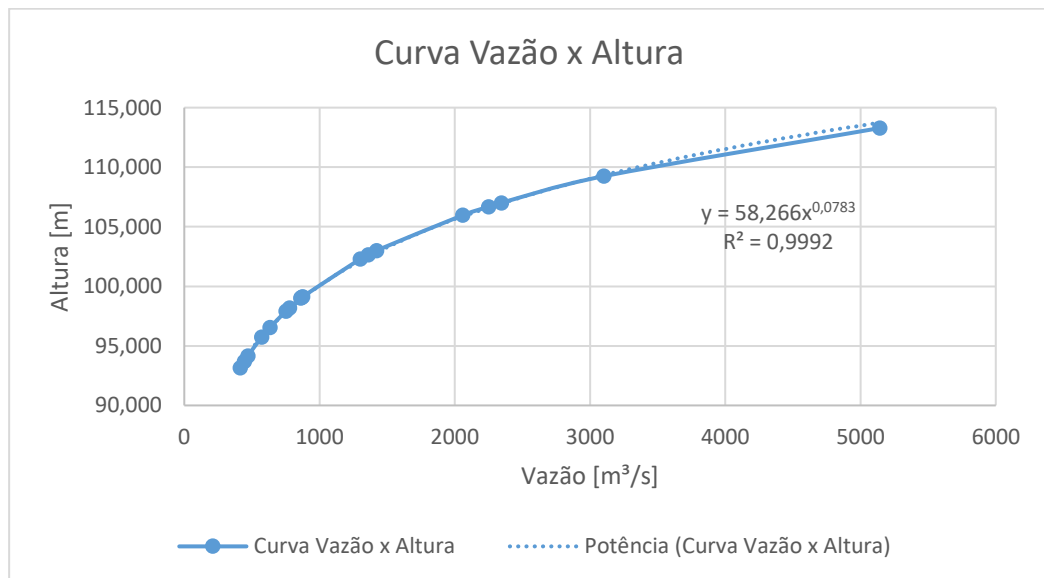
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 7 - Perfil transversal do rio Iguaçu no posto fluviométrico PNI Museu



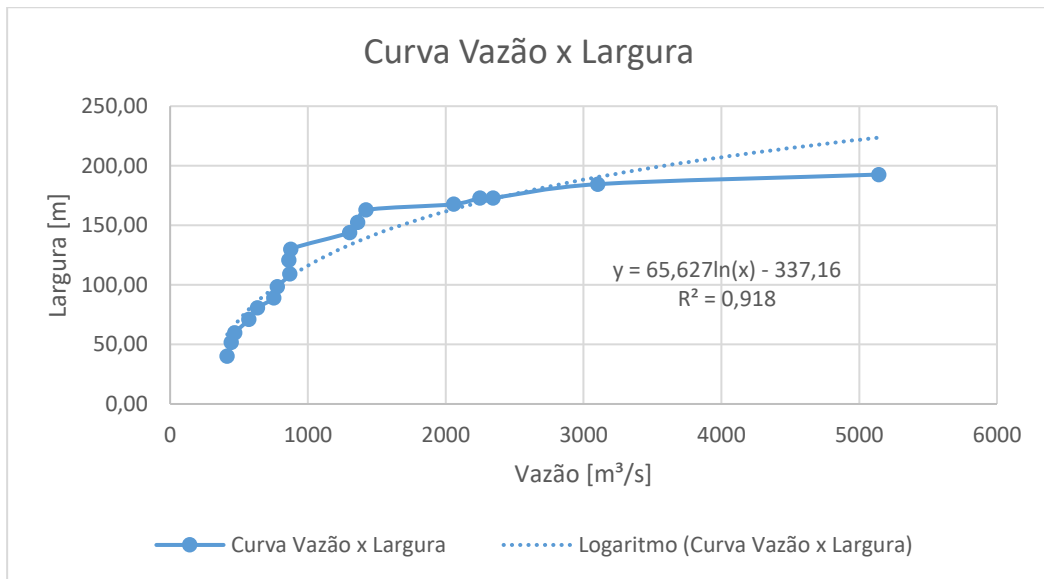
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 8 - Curva vazão x altura - PNI Museu



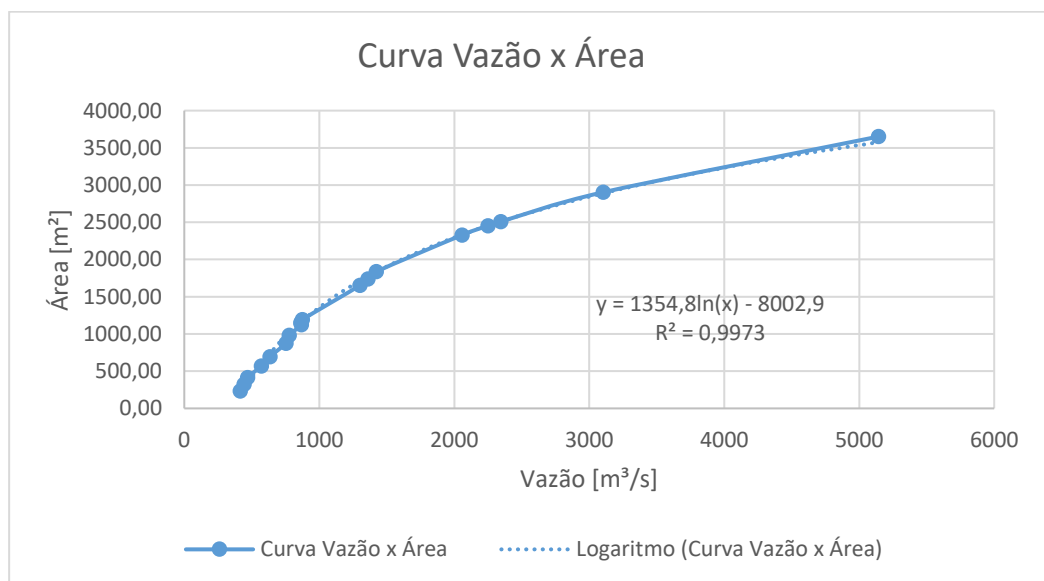
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 9 - Curva vazão x largura - PNI Museu



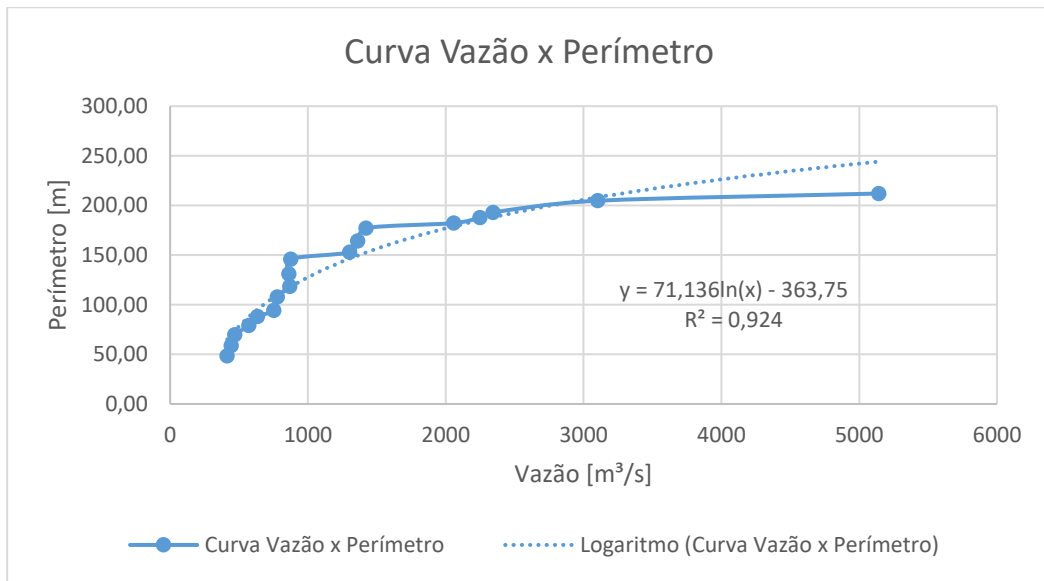
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 10 - Curva vazão x área - PNI Museu



Fonte: o autor, 2016

Gráfico 11 - Curva vazão x perímetro - PNI Museu



Fonte: o autor, 2016

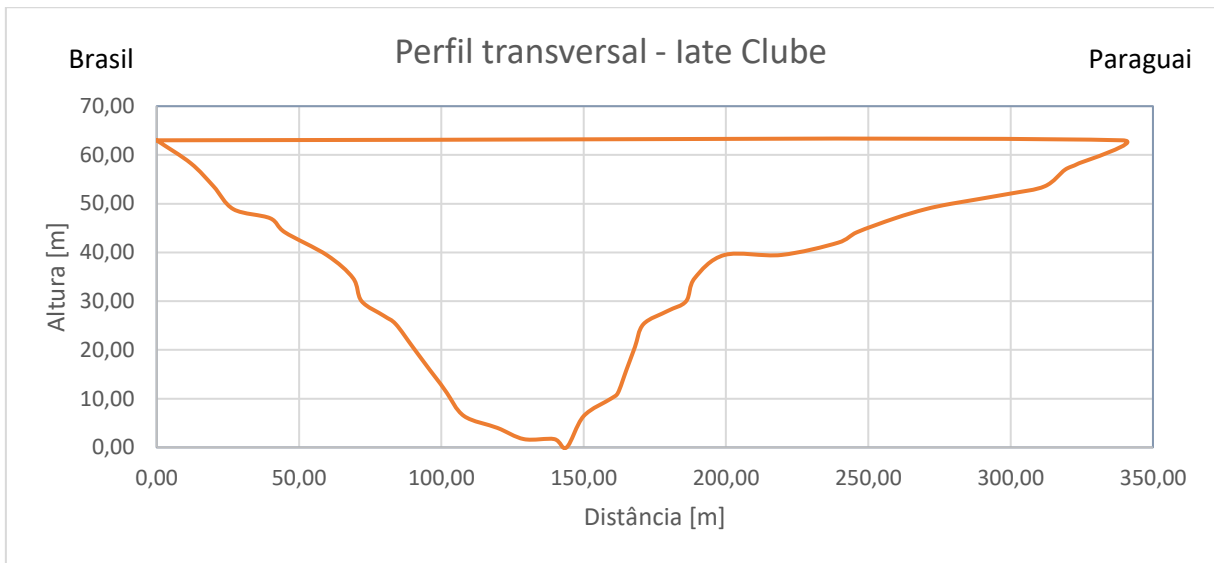


Tabela 7 - Dados do perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube

Perfil transversal – late Clube								
Distância [m]	Profundidade [m]	Altura [m]	Largura [m]	Segmento [m]	Perímetro [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Velocidade [m/s]
0,00	0,00	63,00	339,15	0,00	359,20	9167,93	14473,85	1,58
12,00	4,72	58,29	312,00	12,89	359,20	7633,65	10905,49	1,43
19,95	9,43	53,57	292,05	9,24	333,36	6212,40	8022,87	1,29
27,00	14,15	48,86	243,00	8,48	281,85	4950,91	5737,51	1,16
39,90	16,00	47,00	219,45	13,03	262,56	4521,31	4983,65	1,10
45,00	18,86	44,14	201,00	5,85	235,87	3920,07	3965,78	1,01
59,85	23,58	39,43	139,65	15,58	202,98	3062,59	2629,04	0,86
69,00	28,29	34,71	120,00	10,29	155,92	2446,91	1653,86	0,68
72,00	33,01	30,00	114,00	5,59	140,03	1895,72	972,22	0,51
79,80	36,00	27,00	99,75	8,36	127,69	1628,27	663,00	0,41
84,00	37,72	25,28	87,00	4,54	110,37	1422,06	521,78	0,37
90,00	42,44	20,57	78,00	7,63	100,24	1033,49	246,18	0,24
96,00	47,15	15,85	69,00	7,63	87,02	686,52	95,43	0,14
99,75	50,00	13,00	62,25	4,71	73,80	494,46	46,39	0,09
102,00	51,87	11,14	60,00	2,92	69,09	383,10	26,41	0,07
108,00	56,58	6,42	42,00	7,63	53,27	141,08	3,56	0,03
119,70	59,00	4,00	30,30	11,95	36,85	40,16	0,64	0,02
129,00	61,30	1,70	15,00	9,58	20,23	0,35	0,03	0,00
139,65	61,30	1,70	4,35	10,65				
144,00	63,00	0,00	0,00	4,67				
150,00	56,58	6,42		8,79				
159,60	53,00	10,00		10,25				
162,00	51,87	11,14		2,65				
165,00	47,15	15,85		5,59				
168,00	42,44	20,57		5,59				
171,00	37,72	25,28		5,59				
179,55	35,00	28,00		8,97				
186,00	33,01	30,00		6,75				
189,00	28,29	34,71		5,59				
199,50	23,52	39,48		11,53				
219,45	23,52	39,48		19,95				
239,40	21,00	42,00		20,11				
246,00	18,86	44,14		6,94				
259,35	16,00	47,00		13,65				
270,00	14,15	48,86		10,81				
279,30	13,00	50,00		9,37				
299,25	11,00	52,00		20,05				
312,00	9,43	53,57		12,85				
319,20	6,00	57,00		7,98				
324,00	4,72	58,29		4,97				
339,15	0,00	63,00		0,00				
0,00	0,00	63,00		0,00				

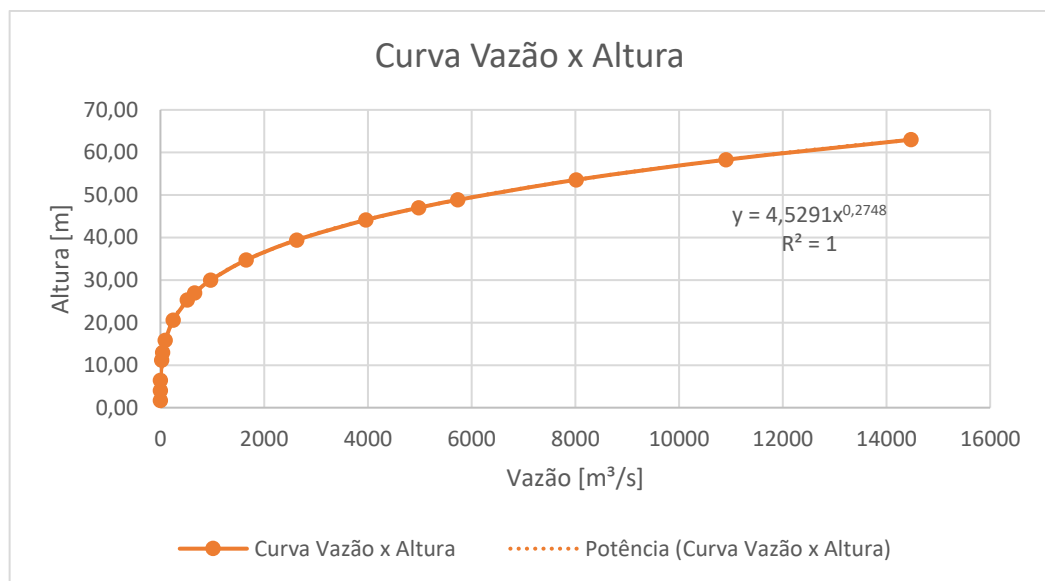
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 12 - Perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube



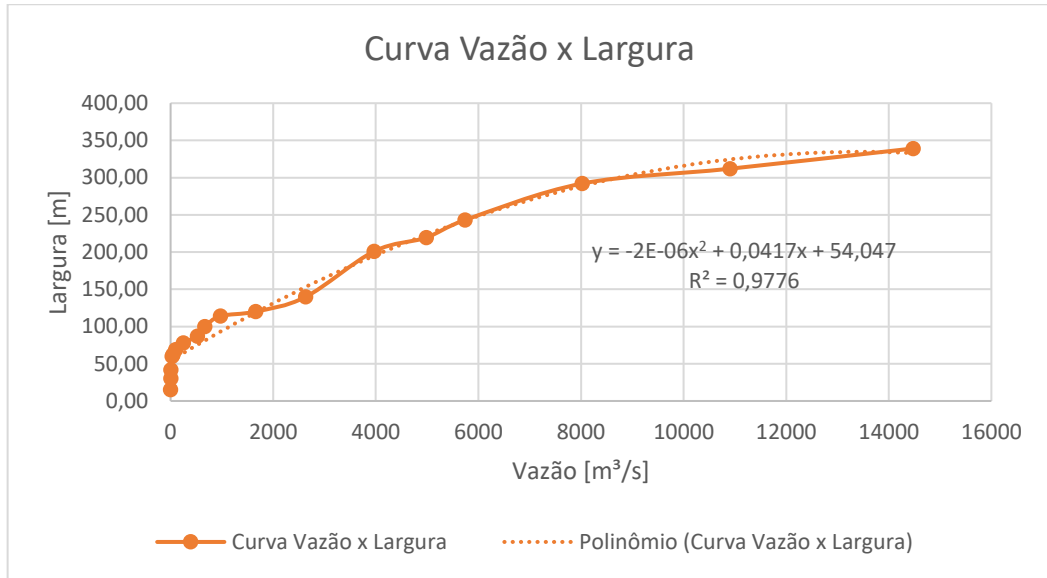
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 13 - Curva vazão x altura - late Clube



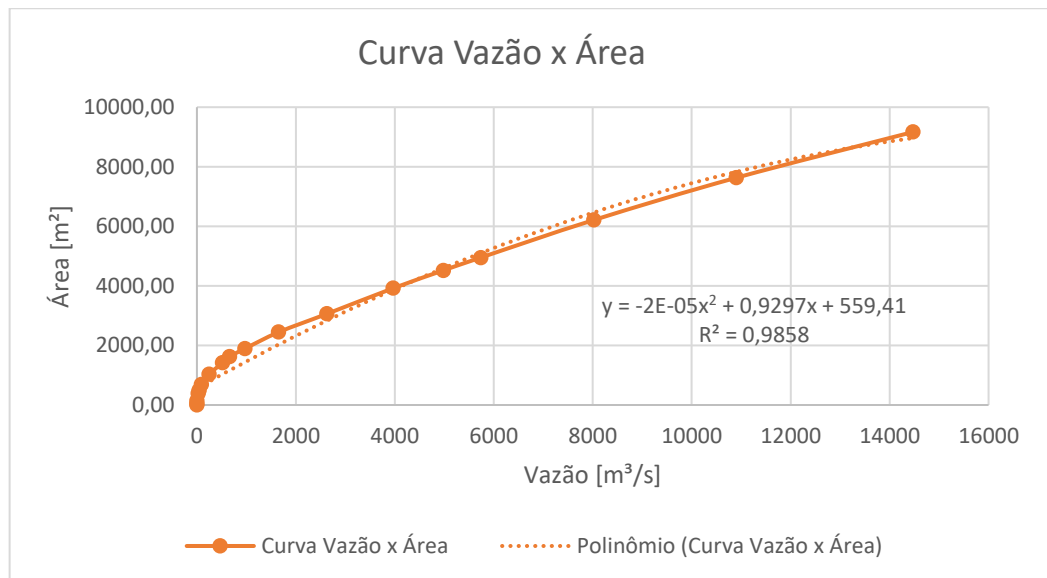
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 14 - Curva vazão x largura - late Clube



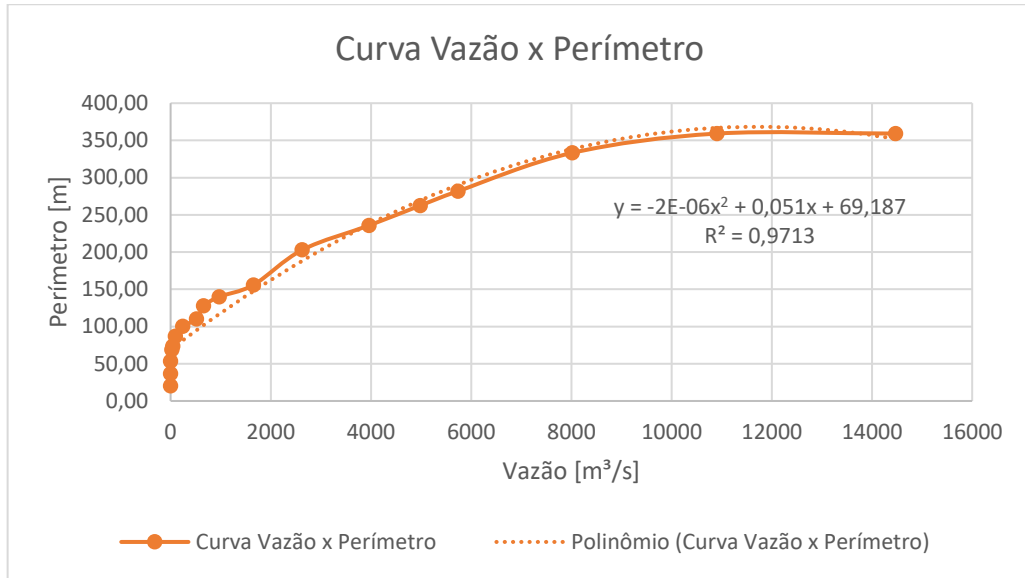
Fonte: o autor, 2016

Gráfico 15 - Curva vazão x área - late Clube



Fonte: o autor, 2016

Gráfico 16 - Curva vazão x perímetro - late Clube



Fonte: o autor, 2016

### 3.2 ESTIMATIVA DA ENERGIA GERADA

Para estimar a energia anual gerada pelos PHCs, foi usado a vazão média relativa aos meses. Para obtenção dos valores da Área (A), Perímetro (P) e Raio hidráulico ( $R_h$ ) da secção transversal onde será instalado as THCs, foram utilizadas as equações obtidas através das curvas dos Gráficos 8 a 11 e 13 a 17. As demais equações são apresentas abaixo:

Vazão:

$$Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (17)$$

Velocidade média:

$$v = \frac{Q}{A} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (18)$$

Número de Froude:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}}} \quad (19)$$

Dependendo do valor do Número de Froude, o escoamento é:

$F_r < 1$  (Subcrítico);  $F_r > 1$  (Supercrítico);  $F_r = 1$  (Crítico)

Número de voltas:

$$n = 12 * v \left[ \frac{rev}{m} \right] \quad (20)$$

Velocidade angular:

$$\omega = n * \frac{2\pi}{60} \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (21)$$

Razão de velocidade de ponta:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{v} \quad (22)$$

Coeficiente de potência:

$$C_p = 0,0019 * \lambda^3 - 0,0582 * \lambda^2 + 0,5956 * \lambda - 0,995 \quad (23)$$

Potência elétrica:

$$P_{el} = \frac{\eta_g * C_p * \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * v^3}{1000} [kW] \quad (24)$$

Energia produzida:

$$EP(mês) = \frac{P_{el} * (n^o \text{ dia mês}) * 24h}{1000} [MWh] \quad (25)$$

Onde:

$g$  : Aceleração da gravidade, igual a 9,81 [m/s<sup>2</sup>]

$R$  : Raio do rotor da turbina, igual a 5 [m]

As planilhas com os valores já calculados, para as THCs instaladas nos rios Iguaçu e Paraná, são apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Energia anual produzida no rio Iguaçu, período 1998-2007

Mês	Q Vazão [m <sup>3</sup> /s]	y Altura [m]	B Largura da superfície do rio [m]	A Área da seção molhada [m <sup>2</sup> ]	P Perímetro molhado [m]	Rh Raio hidráulico [m]	v Velocidade média [m/s]	Fr Nº de Froude	n Nº de voltas [rev/m]	ω Velocidade angular [rad/s]	λ Razão de velocidade de ponta	Cp	Pel Potência elétrica [kW]	EP Energia produzida [MWh/mês]
jan	1260,97	21,75	131,39	1669,87	144,13	11,59	0,76	0,07	9,06	0,95	6,28	0,9209	13,99	10,41
fev	1721,06	24,26	151,81	2091,31	166,26	12,58	0,82	0,07	9,88	1,03	6,28	0,9209	18,10	12,17
mar	1388,05	22,52	137,69	1799,97	150,97	11,92	0,77	0,07	9,25	0,97	6,28	0,9209	14,90	11,08
abr	1888,31	25,02	157,89	2216,95	172,86	12,83	0,85	0,07	10,22	1,07	6,28	0,9209	20,07	14,45
maio	1880,69	24,99	157,63	2211,47	172,57	12,81	0,85	0,07	10,21	1,07	6,28	0,9209	19,98	14,86
jun	1348,95	22,29	135,82	1761,25	148,93	11,83	0,77	0,07	9,19	0,96	6,28	0,9209	14,59	10,51
jul	1510,06	23,20	143,22	1914,11	156,96	12,19	0,79	0,07	9,47	0,99	6,28	0,9209	15,95	11,87
ago	1427,98	22,75	139,56	1838,39	152,98	12,02	0,78	0,07	9,32	0,98	6,28	0,9209	15,22	11,33
set	1913,30	25,13	158,76	2234,76	173,80	12,86	0,86	0,07	10,27	1,08	6,28	0,9209	20,38	14,68
out	2669,86	27,91	180,62	2686,17	197,50	13,60	0,99	0,08	11,93	1,25	6,28	0,9209	31,89	23,73
nov	1789,19	24,58	154,35	2143,90	169,02	12,68	0,83	0,07	10,01	1,05	6,28	0,9209	18,88	13,59
dez	1410,70	22,65	138,76	1821,89	152,12	11,98	0,77	0,07	9,29	0,97	6,28	0,9209	15,08	11,22
<b>Energia anual gerada [MWh/ano]</b>														<b>159,89</b>

Fonte: o autor, 2016

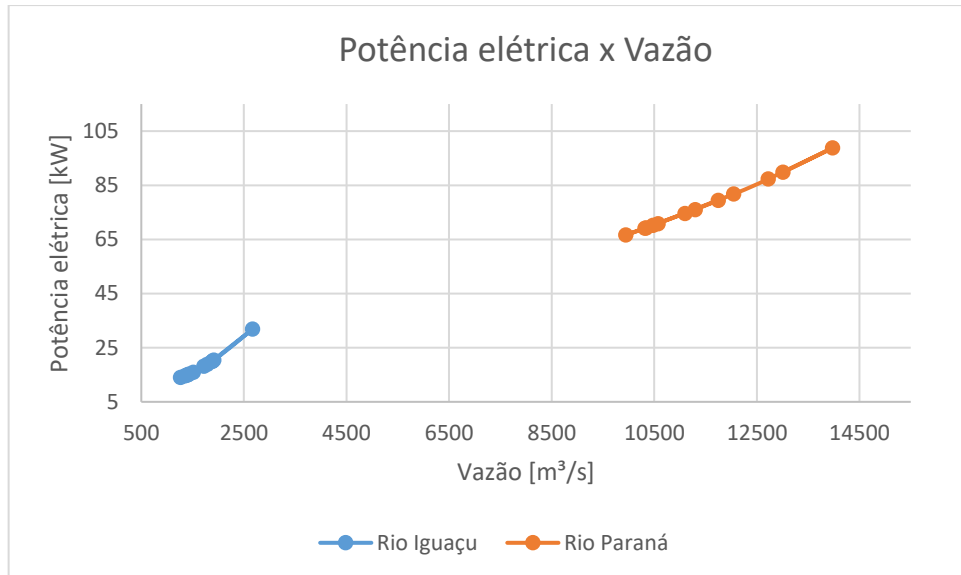
Tabela 9 - Energia anual produzida no rio Paraná, período 2003-2012

Mês	Q Vazão [m³/s]	y Altura [m]	B Largura da superfície do rio [m]	A Área da seção molhada [m²]	P Perímetro molhado [m]	Rh Raio hidráulico [m]	v Velocidade média [m/s]	Fr Nº de Froude	n Nº de voltas [rpm]	$\omega$ Velocidade angular [rad/s]	$\lambda$ Razão de velocidade de ponta	Cp	Pel Potência elétrica [kW]	EP Energia produzida [MWh/mês]
jan	13009	61,18	258,05	9269,33	394,18	23,52	1,40	0,07	16,84	1,76	6,28	0,9209	89,80	66,81
fev	13974	62,39	246,22	9645,41	391,32	24,65	1,45	0,07	17,38	1,82	6,28	0,9209	98,77	66,37
mar	12719	60,80	260,88	9148,98	394,31	23,20	1,39	0,07	16,68	1,75	6,28	0,9209	87,28	64,94
abr	12045	59,90	266,16	8856,02	393,32	22,52	1,36	0,08	16,32	1,71	6,28	0,9209	81,73	58,84
maio	10473	57,64	271,40	8102,69	383,95	21,10	1,29	0,08	15,51	1,62	6,28	0,9209	70,15	52,19
jun	10571	57,79	271,37	8152,18	384,81	21,18	1,30	0,08	15,56	1,63	6,28	0,9209	70,82	50,99
jul	10315	57,40	271,38	8021,21	382,45	20,97	1,29	0,08	15,43	1,62	6,28	0,9209	69,08	51,39
ago	10339	57,44	271,39	8033,84	382,69	20,99	1,29	0,08	15,44	1,62	6,28	0,9209	69,24	51,51
set	9946	56,83	270,95	7827,57	378,58	20,68	1,27	0,08	15,25	1,60	6,28	0,9209	66,63	47,97
out	11294	58,85	269,90	8508,20	390,07	21,81	1,33	0,08	15,93	1,67	6,28	0,9209	75,97	56,52
nov	11094	58,56	270,51	8412,06	388,83	21,63	1,32	0,08	15,83	1,66	6,28	0,9209	74,51	53,65
dez	11746	59,49	267,92	8720,50	392,30	22,23	1,35	0,08	16,16	1,69	6,28	0,9209	79,39	59,06
<b>Energia anual gerada [MWh/ano]</b>														<b>680,26</b>

Fonte: o autor, 2016

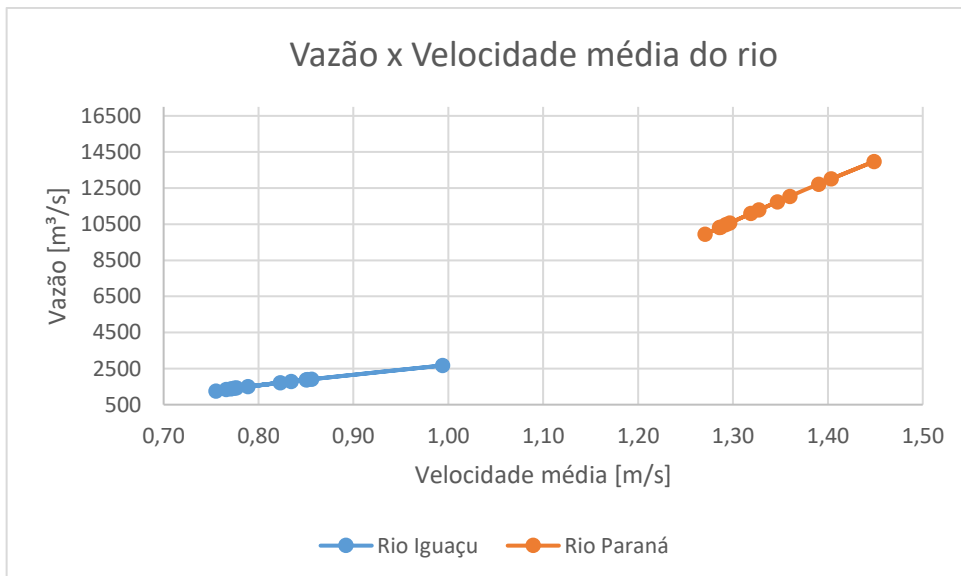
Os Gráficos 17, 18 e 19 mostram respectivamente a relação entre Potência-Vazão, Vazão-Velocidade e Potência-Velocidade, para as THCs nos rios Iguazu e Paraná.

Gráfico 17 - Potência elétrica x Vazão



Fonte: o autor, 2016

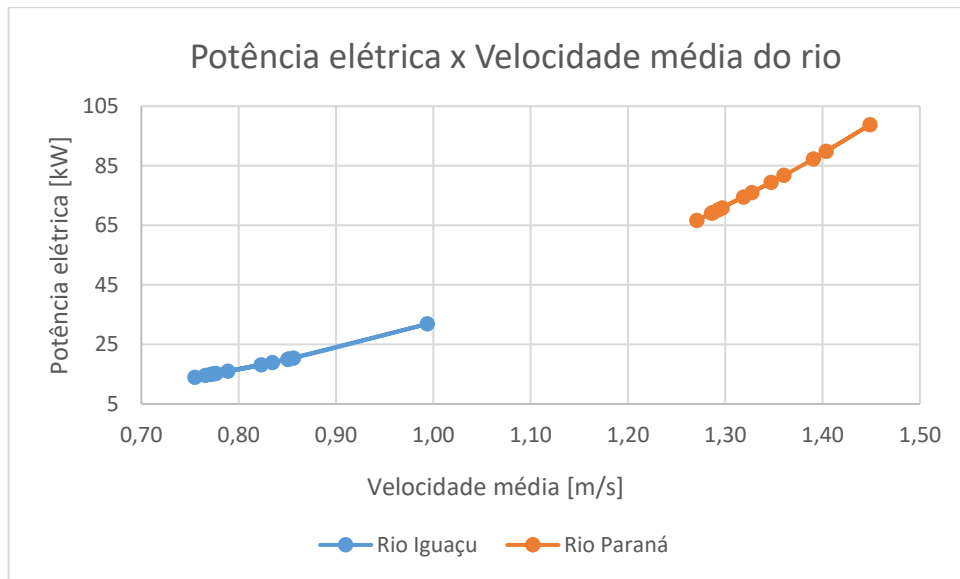
Gráfico 18 - Vazão x Velocidade média do rio



Fonte: o autor, 2016



Gráfico 19 - Potência x Velocidade média do rio



Fonte: o autor, 2016

A energia produzida anualmente por cada THC no rio Iguaçu é de 159,89 MWh, como o PHC possui duas THCs, a produção fica em 319,78 MWh. Quanto a energia produzida por cada THC no rio Paraná, o valor é de 680,26 MWh, com uma produção anual de 1.360,52 MWh para as duas turbinas. Constata-se que o rio Paraná possui um potencial energético maior que o rio Iguaçu, cerca de 4 vezes, com isso, aproveitando melhor a capacidade das THCs.

Para verificação da viabilidade técnica, foi calculado e comparado o Fator de Capacidade (FC) do PHC em ambos os rios. Para o parque no rio Iguaçu o FC fica:

$$FC = \frac{319,78}{8760 * 1} = 0,0365 \text{ ou } 3,65 \%$$

Para parque no rio Paraná o FC fica:

$$FC = \frac{1360,52}{8760 * 1} = 0,1553 \text{ ou } 15,53 \%$$

É importante esclarecer que valores típicos de FC variam entre 25 e 60 %, inviabilizando com isso o PHC no rio Iguaçu. Quanto ao PHC no rio Paraná, para que seja viável sua instalação, há necessidade de melhorar no FC, por exemplo, posicionando as turbinas em pontos de maior velocidade do rio.

## 4 CONCLUSÃO

A proposta de aproveitamento hidrocínético mostrou ser uma solução interessante, tanto em função do auxílio para o avanço nas pesquisas, como uma boa oportunidade de negócio para as empresas interessadas em investir nessa área.

Para esta proposta foi definido que seria utilizado a turbina hidrocínética do projeto Tucunaré, e de acordo com suas características, condições de operação e dimensões, o trecho no leito do rio selecionado deve possuir escoamento subcrítico, ter largura acima de 50 metros e profundidade entre 20 e 50 metros. Os dois rios escolhidos para esta proposta cumprem com estes requisitos, restando apenas definir um ponto onde o trecho fosse mais estreito, o que foi conseguido com auxílio do Google Earth. A profundidade foi conseguida através de dados do perfil transversal dos rios, proporcionando o relacionamento entre cota e vazão.

Durante a análise foi realizado o levantamento das vazões médias para o período de 10 anos, usando dados de postos fluviométricos, a partir desses valores e com a área hidráulica para as alturas de cota, foi estimada a velocidade do curso da água. Na sequência, através da metodologia sugerida neste trabalho, foi obtido o valor estimado da energia gerada pelos parques hidrocínéticos propostos, sendo 319,78 MWh para o PHC no rio Iguaçu e 1.360,52 MWh para o PHC do rio Paraná. Como resultado, constatou-se que o rio Paraná possui um potencial energético muito maior que o rio Iguaçu, cerca de 4 vezes, com isso, aproveitando melhor a capacidade das THCs.

Os resultados demonstram que independente do porte do rio, após os estudos preliminares, o trecho escolhido para instalação, deve ainda ser submetido a batimetria, para comprovação de seu perfil transversal e uma aferição da velocidade do rio com equipamentos, como por exemplo ADCP. Isso é necessário para que se possa posicionar a THC no local onde a velocidade do rio é mais alta, conseqüentemente melhorando o Fator de Capacidade.

É certo que para tornar realidade esta proposta é imprescindível um aprofundamento maior no tema, como por exemplo, uma projeção mais detalhada da energia elétrica desejada, um levantamento mais preciso sobre a velocidade do rio e um estudo da viabilidade econômica e financeira, o que pode ser obtido em estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

BORMA, L. S.; RENNÓ, C. D. **Processos Hidrológicos**: São José dos Campos, 2016. 51 slides, color. Disponível em:

<[http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/pdf/cst318\\_08hidrometriaevazao.pdf](http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/pdf/cst318_08hidrometriaevazao.pdf)>.

Acesso em: 1 jun. 2016.

BOTAN, A. C. B. et al. **Energia hidrocínética**: aproveitamento em correntes de baixas velocidades. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2016, Itajubá. Anais. Gramado: 2016.

BRASÍLIA. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. Agência Nacional das Águas (Ed.). **Hidroweb**: Sistema de Informações Hidrológicas. 2016. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

CUNHA, J. T. L. **Análise de Estabilidade da Turbina Hidrocínética HTUC-01 em Condições de Operação**. 2015. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

OPSH.DT, Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos, Itaipu Binacional. Hidrologia do Rio Iguaçu após Cataratas [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <[glaucio.roloff@unila.edu.br](mailto:glaucio.roloff@unila.edu.br)> em 12 ago.2016.

FELIZOLA, E. R.; MAROCCOLO, J. F.; FONSECA, M. R. S. **Identificação de áreas potenciais para implantação de turbina hidrocínética através da utilização de técnicas de geoprocessamento**. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. Anais. Florianópolis: INPE, 2007. p. 2549 - 2556.

FONSECA, E. N.; ARAUJO, I. G. de. **Projeto do Sistema de Transmissão e Estrutura de Turbina Hidrocínética**. 2013. 118 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

GÁES, C. A. A. **Análisis Hidrodinámico de una Turbina Hidrocínética con difusor mediante herramientas numéricas**. 2015. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniero Naval, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2015. Cap. 3.

GAMARO, P. E. **Medidores Acústicos Doppler de Vazão**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2012. 164 p.

IBAMA. Margarene Maria Lima Beserra. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Org.). **Plano de Manejo do Parque Nacional do Iguaçu**. 1999. Disponível em: <[http://www.cataratasdoiguacu.com.br/manejo/siuc/planos\\_de\\_manejo/pni/html/index.htm](http://www.cataratasdoiguacu.com.br/manejo/siuc/planos_de_manejo/pni/html/index.htm)>. Acesso em: 1 jun. 2016.

ITAIPU. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em:

<[https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina\\_Hidrelétrica\\_de\\_Itaipu](https://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrelétrica_de_Itaipu)> Acesso em: 1 jun. 2016.

JUNIOR, A. C. P. B. *et al.* **Turbina Hidrocinética Geração 3**. In: IV CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2007, Araxás. ANEEL, 2007. 10 p.

MAIMUN, A.; BEHROUZI, F.; NAKISA, M. Review of Various Designs and Development in Hydropower Turbines. **Mechatronic And Manufacturing Engineering**, Malásia, v. 8, n. 2, 2014.

OLIVEIRA, A. G. F. de; SILVA, P. F. A. da. **Proposta de sistema de fundeio e flutuação para turbina hidrocinética**. 2015. 118 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

OPENEI. **Marine and Hydrokinetic Technology Database**. Disponível em: <[http://en.openei.org/wiki/Marine\\_and\\_Hydrokinetic\\_Technology\\_Database](http://en.openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Database)>. Acesso em: 1 jun. 2016.

OPSH.DT, Divisão de Estudos Hidrológicos e Energéticos, Itaipu Binacional. **Hidrologia do Rio Iguaçu após Cataratas** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <glauccio.roloff@unila.edu.br> em 12 ago.2016.

PICOLO, A. P.; RÜHLER, A. J.; RAMPINELLI, G. A. Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 36, n. 4, p.01-13, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172014000400007>.

PLANTIER, R. D. **Ictiofauna**: Características Gerais e Danos no Rio Prata. 2013. Disponível em: <<http://meioambiente.culturamix.com/ecologia/ictiofauna-caracteristicas-gerais-e-danos-no-rio-prata>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

RIO IGUAÇU. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio\\_Iguaçu](https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Iguaçu)> Acesso em: 1 jun. 2016.

RIO PARANÁ. In: Wikipédia: a enciclopédia livre. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio\\_Paraná](https://pt.wikipedia.org/wiki/Rio_Paraná)> Acesso em: 1 jun. 2016.

ROMERO, I. **Cálculo en Excel del área de un polígono irregular - producto en cruz**. 2012. Disponível em: <<http://excelforo.blogspot.com.br/2012/10/calculo-en-excel-del-area-de-un.html>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

SANTA ANA, J. M. R. de; SILVA, M. Z. e. **Sistema de Monitoração de Turbinas Hidrocinéticas**. 2014. 110 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SANTOS, I. dos *et al.* **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento, 2001. 372 p.

SANTOS, S. M. dos *et al.* **Turbina Hidrocinética Axial**. In: 10 BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 2004, Rio de Janeiro. Proceedings. Rio de Janeiro: ABCM, 2004. 5 p.

SILVA, P. A. S. F. e. **Estudo Numérico de Turbinas Hidrocinéticas de Eixo Horizontal.** 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

TEIXEIRA, R. A. G. **Montagem e Instalação de Turbinas Hidrocinéticas.** 2014. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

VELOSO, G. G.; CLEMENTE, R. E. B. **Estudo Comparativo entre Perfis Hidrodinâmicos de Rotores de Turbinas Hidrocinéticas.** 2013. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

## APÊNDICE A

Tabela A.1 - Resumo das vazões médias de Jan 1998 a Dez de 2007 no rio Iguazu

<b>Data</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>Média</b>
<b>jan</b>	2094	1225	966	1431	1050	1615	1393	1100	914	822	<b>1261</b>
<b>fev</b>	3054	1555	1331	4191	1558	1611	963	1066	953	928	<b>1721</b>
<b>mar</b>	3142	1235	1075	2058	1231	1465	1044	916	909	806	<b>1388</b>
<b>abr</b>	7570	1572	1091	1967	952	1255	892	473	779	2332	<b>1888</b>
<b>mai</b>	4270	1248	1279	1377	1950	1088	1281	1137	701	4475	<b>1881</b>
<b>jun</b>	1529	1790	981	1333	1384	1256	945	1728	519	2024	<b>1349</b>
<b>jul</b>	1484	2934	1066	1783	1206	985	1995	1936	339	1373	<b>1510</b>
<b>ago</b>	4290	1362	775	1749	971	970	1552	1289	237	1084	<b>1428</b>
<b>set</b>	4826	1404	2836	1526	1352	995	1045	3745	527	878	<b>1913</b>
<b>out</b>	5409	1277	3784	3161	2309	1217	1661	6116	886	878	<b>2670</b>
<b>nov</b>	1614	904	1474	1622	2947	1200	3258	2594	770	1510	<b>1789</b>
<b>dez</b>	1233	1096	1014	1450	2825	1722	1549	1089	961	1169	<b>1411</b>
<b>Média</b>	<b>3376</b>	<b>1467</b>	<b>1473</b>	<b>1971</b>	<b>1645</b>	<b>1282</b>	<b>1465</b>	<b>1932</b>	<b>708</b>	<b>1523</b>	

Fonte: o autor, 2016

Tabela A.2 - Resumo das vazões médias de Jan 2003 a Dez de 2012 no rio Paraná

<b>Data</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>Média</b>
<b>jan</b>	10066	9497	14933	11840	16881	10282	9347,7	22410	12668	12168	<b>13009</b>
<b>fev</b>	14634	9363	15784	10954	22110	9923,1	10483	20216	14892	11375	<b>13974</b>
<b>mar</b>	12520	9450	9927,8	13707	15099	10936	11374	14045	19300	10835	<b>12719</b>
<b>abr</b>	11270	9599	10579	12562	10952	12859	11097	15249	15291	10992	<b>12045</b>
<b>mai</b>	9509	11467	9571,6	9804,1	10255	11206	9289,5	11398	11026	11208	<b>10473</b>
<b>jun</b>	9342	12089	9275,8	9937,5	9438,7	10733	9704,3	10276	10351	14558	<b>10571</b>
<b>jul</b>	8990	11007	8935,1	10021	9683,3	9829,9	10924	10055	11096	12608	<b>10315</b>
<b>ago</b>	9011	9430	9013,4	10012	9513,4	12113	10517	9683	13471	10628	<b>10339</b>
<b>set</b>	9511	9295	8858,1	9959,6	9728,5	9567	12897	9439,1	10342	9859,1	<b>9946</b>
<b>out</b>	10360	11108	13030	9712,6	9576,4	10606	15932	11027	11278	10307	<b>11294</b>
<b>nov</b>	10213	12103	10895	9949,1	10184	10673	14053	10784	11951	10136	<b>11094</b>
<b>dez</b>	11158	10583	12322	10793	9934,6	9425	19230	12159	11301	10558	<b>11746</b>
<b>Média</b>	<b>10549</b>	<b>10416</b>	<b>11094</b>	<b>10771</b>	<b>11946</b>	<b>10679</b>	<b>12071</b>	<b>13062</b>	<b>12747</b>	<b>11269</b>	

Fonte: o autor, 2016

Tabela A.3 - Frequências mensal, relativa e acumulada no rio Iguazu

Q [m³/s]			Frequência	Freq. Relativa	Freq. Acumulada
Lim Inferior	Lim Superior	Média			
6656	7573	7114	1	0,0083	0,0083
5739	6656	6197	1	0,0083	0,0167
4822	5739	5280	2	0,0167	0,0333
3905	4822	4363	4	0,0333	0,0667
2988	3905	3446	6	0,0500	0,1167
2071	2988	2529	8	0,0667	0,1833
1154	2071	1612	53	0,4417	0,6250
237	1154	695	45	0,3750	<b>1</b>
			<b>120</b>	<b>1</b>	

Fonte: o autor, 2016

Tabela A.4 - Frequências mensal, relativa e acumulada no rio Paraná

Q [m³/s]			Frequência	Freq. Relativa	Freq. Acumulada
Lim. Inferior	Lim. Superior	Média			
<b>20716</b>	<b>22410</b>	21563	2	0,0167	0,0167
<b>19022</b>	<b>20716</b>	19869	3	0,0250	0,0417
<b>17328</b>	<b>19022</b>	18175	0	0,0000	0,0417
<b>15634</b>	<b>17328</b>	16481	3	0,0250	0,0667
<b>13940</b>	<b>15634</b>	14787	9	0,0750	0,1417
<b>12246</b>	<b>13940</b>	13093	10	0,0833	0,2250
<b>10552</b>	<b>12246</b>	11399	39	0,3250	0,5500
<b>8858</b>	<b>10552</b>	9705	54	0,4500	<b>1</b>
			<b>120</b>	<b>1</b>	

Fonte: o autor, 2016

Tabela A.5 - Dados da Velocidade do rio e da Potência elétrica

Velocidade da corrente do rio [m/s]	Potência Elétrica [W]
0,5	4.064
1	32.514
1,5	109.735
2	260.112
2,5	508.030
3	877.876
3,5	1.394.035
4	2.080.892
4,5	2.962.833
5	4.064.243

Fonte: o autor, 2016