



**XXIV SNPTEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GGH/01

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - 1**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROCINÉTICOS**  
**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ**

**Marcos Aurélio de Araujo(\*)**  
**UNILA - UNIOESTE**

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma análise preliminar e comparativa entre dois estudos de prospecção de parques hidrocinéticos, um no rio Iguaçu e outro no rio Paraná. Cada parque 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. Analisando os resultados, constata-se que o empreendimento no rio Paraná aproveita melhor a capacidade das turbinas hidrocinéticas.

## PALAVRAS-CHAVE

Parque Hidrocinético, Turbina Hidrocinética, Projeto Tucunaré, Rio Iguaçu, Rio Paraná

## 1.0 - INTRODUÇÃO

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, foi investigado o aproveitamento da energia cinética do fluxo da água e sua conversão em energia elétrica. Para essa análise foram escolhidos dois locais, em rios de diferentes portes, porém que comportavam o mesmo equipamento para a conversão de energia. Nos locais foram simulados Parques Hidrocinéticos (PHC) com potência nominal de 1 MW, contendo duas Turbinas Hidrocinéticas (THCs) 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.

### 1.1 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.



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

### 1.2 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 características gerais da THC do Projeto Tucunaré 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>

Tabela 2 - Condições de operação prevista (5)

<b>GRANDEZA</b>	<b>VALOR PREVISTO</b>
<b>Potência elétrica gerada</b>	500 kW
<b>Velocidade de corrente do rio</b>	1,7 a 2,5 m/s
<b>Rotação nominal da turbina</b>	25 rpm
<b>Potência nominal</b>	160 kW (1,7 m/s) e 500 kW (2,5 m/s)

Tabela 3 - Principais dimensões (5)

<b>GRANDEZA</b>	<b>VALOR PREVISTO</b>
<b>Diâmetro do rotor</b>	10 m
<b>Largura da carenagem da nacele</b>	2 m
<b>Comprimento total</b>	5,3 m
<b>Massa total</b>	17.000 kg

## 2.0 - MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Escolha do local

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. Foi definido para o rio Iguaçu o ponto nas coordenadas de latitude 25°36'58.98"S e longitude 54°29'44.07"O e para o rio Paraná o ponto nas coordenadas de latitude 25°32'37.81"S e longitude 54°35'37.12"O, por apresentarem largura menor que o restante do rio no trecho de interesse.

### 2.2 Fluviograma

O levantamento de dados de vazão foi obtido de estações fluviométricas, através do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) elaborado pela Agência Nacional de Águas (1), que possibilitou a caracterização do regime hidrológico ao longo do ano. Foram escolhidos o posto fluviométrico Salto Cataratas (Código ANA 65993000) no rio Iguaçu e o posto fluviométrico Itaipu R-2 (Código ANA 64903000) no rio Paraná, para servirem de base para a obtenção da série de vazões utilizadas para dimensionamento do PHC. 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.

### 2.3 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 (4), conforme equação abaixo:

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

Onde:

A : área do polígono irregular [m<sup>2</sup>]

x e y : coordenadas dos vértices do polígono

### 2.4 Secção transversal do rio

A secção transversal do rio Iguaçu foi obtida com dados fornecidos pela Itaipu Binacional (3), enquanto que a secção transversal do rio Paraná, foi obtido de Gamaro (2). Com base no perfil transversal dos rios Iguaçu e Paraná, foram montadas tabelas, 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 nas Figuras 2 e 3.

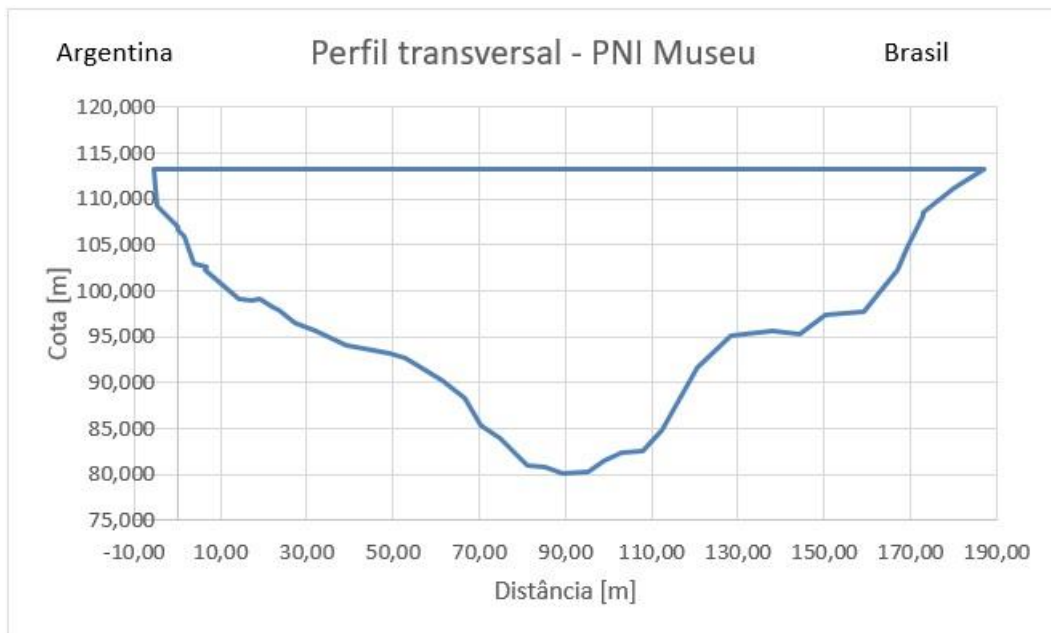


Figura 2 - Perfil transversal do rio Iguaçu no posto fluviométrico PNI Museu



Figura 3 - Perfil transversal do rio Paraná no posto fluviométrico late Clube

### 2.5 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 (Rh) da secção transversal onde será instalado as THCs, foram utilizadas as equações obtidas através das curvas Vazão versus Altura, Largura, Área e Perímetro. As demais equações são apresentadas abaixo:

Vazão:

$$Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (2)$$

Velocidade média:

$$v = \frac{Q}{A} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3)$$

Número de Froude:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot \frac{A}{B}}} \quad (4)$$

Número de voltas:

$$n = 12 * v \left[ \frac{rev}{m} \right] \quad (5)$$

Velocidade angular:

$$\omega = n * \frac{2\pi}{60} \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (6)$$

Razão de velocidade de ponta:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{v} \quad (7)$$

Coefficiente de potência:

$$C_p = 0,0019 * \lambda^3 - 0,0582 * \lambda^2 + 0,5956 * \lambda - 0,995 \quad (8)$$

Potência hidrocínética:

$$P_{hc} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * v^3 [W] \quad (9)$$

Potência elétrica:

$$P_{el} = \frac{\eta_g * C_p * \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi * D^2}{4} * v^3}{1000} [kW] \quad (10)$$

Energia produzida:

$$EP(mês) = \frac{P_{el} * (n^{\circ} \text{ dia mês}) * 24h}{1000} [MWh] \quad (11)$$

Onde:

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

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

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

$D$  : diâmetro do rotor, igual a 10 [m]

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

$\eta_g$  : Rendimento geral

### 3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As planilhas com os valores já calculados, para as THC's instaladas nos rios Iguazu e Paraná, são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Energia anual produzida no rio Iguazu

Mês	Q Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Área da secção molhada [m <sup>2</sup> ]	$v$ Velocidade média [m/s]	n Nº de voltas [rev/m]	$\omega$ Velocidade angular [rad/s]	$\lambda$ Razão de velocidade de ponta	Potência elétrica [kW]	Energia produzida [MWh/mês]
jan	1260,97	1669,87	0,76	9,06	0,95	6,28	13,99	10,41
fev	1721,06	2091,31	0,82	9,88	1,03	6,28	18,10	12,17
mar	1388,05	1799,97	0,77	9,25	0,97	6,28	14,90	11,08
abr	1888,31	2216,95	0,85	10,22	1,07	6,28	20,07	14,45
maio	1880,69	2211,47	0,85	10,21	1,07	6,28	19,98	14,86
jun	1348,95	1761,25	0,77	9,19	0,96	6,28	14,59	10,51
jul	1510,06	1914,11	0,79	9,47	0,99	6,28	15,95	11,87
ago	1427,98	1838,39	0,78	9,32	0,98	6,28	15,22	11,33
set	1913,30	2234,76	0,86	10,27	1,08	6,28	20,38	14,68
out	2669,86	2686,17	0,99	11,93	1,25	6,28	31,89	23,73
nov	1789,19	2143,90	0,83	10,01	1,05	6,28	18,88	13,59
dez	1410,70	1821,89	0,77	9,29	0,97	6,28	15,08	11,22
<b>Energia anual gerada [MWh/ano]</b>								<b>159,89</b>

Tabela 5 - Energia anual produzida no rio Paraná

Mês	Q Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Área da secção molhada [m <sup>2</sup> ]	$v$ Velocidade média [m/s]	n Nº de voltas [rev/m]	$\omega$ Velocidade angular [rad/s]	$\lambda$ Razão de velocidade de ponta	Potência elétrica [kW]	Energia produzida [MWh/mês]
jan	13009	9269,33	1,40	16,84	1,76	6,28	89,80	66,81
fev	13974	9645,41	1,45	17,38	1,82	6,28	98,77	66,37
mar	12719	9148,98	1,39	16,68	1,75	6,28	87,28	64,94
abr	12045	8856,02	1,36	16,32	1,71	6,28	81,73	58,84
maio	10473	8102,69	1,29	15,51	1,62	6,28	70,15	52,19
jun	10571	8152,18	1,30	15,56	1,63	6,28	70,82	50,99
jul	10315	8021,21	1,29	15,43	1,62	6,28	69,08	51,39
ago	10339	8033,84	1,29	15,44	1,62	6,28	69,24	51,51
set	9946	7827,57	1,27	15,25	1,60	6,28	66,63	47,97
out	11294	8508,20	1,33	15,93	1,67	6,28	75,97	56,52
nov	11094	8412,06	1,32	15,83	1,66	6,28	74,51	53,65
dez	11746	8720,50	1,35	16,16	1,69	6,28	79,39	59,06
<b>Energia anual gerada [MWh/ano]</b>								<b>680,26</b>

A energia produzida anualmente por cada THC no rio Iguazu é de 159,89 MWh, como o PHC possui duas THC's, 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. Consta-se que o rio Paraná possui um potencial energético maior que o rio Iguazu, cerca de 4 vezes, com isso, aproveitando melhor a capacidade das THC's. Para

verificação da viabilidade técnica, foi calculado e comparado o Fator de Capacidade (FC) do PHC em ambos os rios. O cálculo do FC, considerando o período de 1 ano, usa a seguinte equação:

$$FC = \frac{EAG}{\Delta t * P_n} \quad (12)$$

Onde:

FC = Fator de capacidade

EAG = Energia anual gerada [MWh/ano]

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

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

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:

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

O FC de 3,65 %, inviabiliza 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.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

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, consequentemente melhorando o Fator de Capacidade.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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.
- (2) GAMARO, P. E. Medidores Acústicos Doppler de Vazão. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2012. 164 p.
- (3) 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.
- (4) ROMERO, I. Cálculo em 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.
- (5) 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.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Nome: Marcos Aurélio de Araujo

Local e ano de nascimento: Curitiba - PR, 1966

Local e ano de graduação: Graduado em Engenharia de Energia - UNILA, Foz do Iguaçu - PR, 2016  
Mestrando em Engenharia Elétrica – UNIOESTE, Foz do Iguaçu – PR