

## **ANÁLISE PRELIMINAR DO POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DE UMA BACIA COM CARÊNCIA DE DADOS FLUVIOMÉTRICOS**

*Bárbara Prudente Cançado<sup>1</sup> & José Eduardo Alamy Filho<sup>2\*</sup>*

**Resumo** – Este trabalho baseou-se na estimativa preliminar do potencial hidroenergético do Rio Jordão, afluente do Rio Paranaíba, localizado nas proximidades da cidade de Araguari, Minas Gerais. Em função da carência de dados do rio estudado, a regionalização da curva de permanência de vazões possibilitou a geração das vazões de referência para a estimativa preliminar da potência instalada para pequenas centrais hidrelétricas (PCH), localizadas em diferentes sítios do rio analisado. Para a regionalização, utilizaram-se séries históricas de quatro estações fluviométricas instaladas no alto curso do Rio Bagagem, cuja bacia é contígua à bacia alvo. As curvas de permanência de vazões da bacia fonte foram ajustadas por polinômios de quinto grau. Parâmetros morfoclimáticos como precipitação, desníveis e área de drenagem foram utilizados na regressão linear múltipla que permitiu construir as equações de regionalização para a bacia alvo. A escolha do sítio de instalação da PCH foi feita comparando-se quatro possíveis locais de implantação da usina, considerando a potência instalada que resultasse em menor área alagada e menor comprimento da barragem. Diante deste critério, constatou-se que os locais mais propícios para instalação da PCH devem ser classificados de acordo com as faixas de potência desejadas.

**Palavras-Chave** – regionalização de vazões, curva de permanência de vazões, pequenas centrais hidrelétricas.

### **PRELIMINARY ANALYSIS OF HYDROPOWER POTENTIAL OF A BASIN WITH LACK OF STREAMFLOW DATA**

**Abstract** – This work was based on a preliminary assessment of the hydropower potential of the Jordan River, a tributary of the Paranaíba River, located near the town of Araguari, Minas Gerais. Due to the lack of data of the river studied, the regionalization of the flow duration curves enabled the generation of the reference flow for the preliminary estimate of installed capacity for small hydroelectric station (SHS), leased at different sites of the river analyzed. For regionalization, were used historical series of four stations installed in the upper course of the Bagagem River, whose basin is contiguous to the target basin. The flow duration curves of the source basin were adjusted by fifth degree polynomials. Morphoclimatic parameters as precipitation, height differences and drainage area were used in multiple linear regression which allowed building of regionalization equations for the target basin. The choice of the site of installation of the plant was done by comparing four possible deployment locations of the plant, considering the installed capacity would result in lower reservoir area and shorter length of the dam. Given this criterion, it was found that the most favorable locations for installation of SHS should be classified according to the desired power ranges.

**Keywords** – hydrologic regionalization, flow duration curve, small hydroelectric stations.

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia (UFU); Faculdade de Engenharia Civil; bpcancado@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia (UFU); Faculdade de Engenharia Civil; zealamy@yahoo.com.br

\* Autor Correspondente

## INTRODUÇÃO

A energia elétrica consumida no Brasil é fornecida primordialmente por usinas hidrelétricas que são responsáveis por 68% de toda energia elétrica produzida no país (ANEEL, 2010). De acordo com o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2010), disponibilizado pela ANEEL, a participação das pequenas centrais hidrelétricas é de apenas 2%. Com a desestatização do setor energético no Brasil, muitos investidores foram atraídos para o mercado, fazendo com que a oferta de energia no país fosse aprimorada. Em um cenário com novos investidores independentes e consumidores livres, considerando ainda a alta demanda do mercado nacional junto a baixos investimentos, as PCH têm se mostrado um grande atrativo para investidores privados.

Dentre as várias vantagens da implantação de PCH, cita-se a redução de impactos ambientais, explicada pela limitada ou reduzida área de inundação do reservatório da usina. Além disto, as PCH podem fornecer energia para pequenos centros urbanos ou regiões rurais, complementando sistemas interligados já existentes. A despeito disto, pequenas bacias hidrográficas geralmente não dispõem de séries históricas de vazão, fator que permitiria uma quantificação mais precisa do seu potencial hidroenergético. Nos estudos de viabilidade do empreendimento nessas bacias, a solução para esta carência de dados é contornada por métodos de regionalização de vazões.

Diante dessas realidades, o presente artigo foi desenvolvido visando à análise preliminar de implantação de uma PCH no Rio Jordão, concebida com a regionalização da curva de permanência de vazões a partir de séries históricas de vazões da bacia adjacente do Rio Bagagem.

## RECORTE ESPACIAL DO ESTUDO

O recorte espacial deste estudo focou-se na bacia do Rio Jordão, situado no Triângulo Mineiro, afluente da margem esquerda do Rio Paranaíba, conforme ilustra a Figura 1.

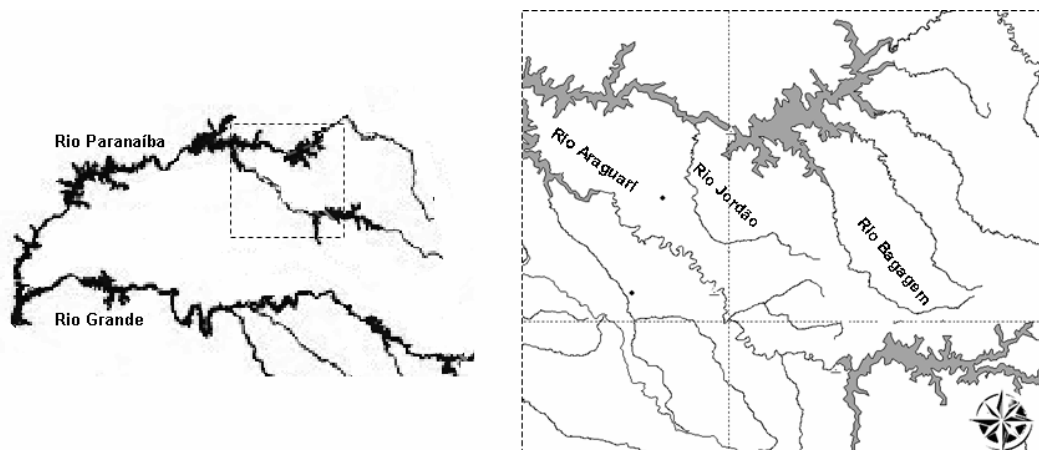


Figura 1 - Localização dos Rios Jordão (alvo) e Bagagem (fonte)

A carência de dados fluviométricos para o rio estudado tornou necessária a utilização de métodos de estimativa de vazões de referência para o estudo do seu potencial hidroenergético. Para a regionalização da curva de permanência de vazões (CPV), foram utilizados dados de quatro estações fluviométricas e pluviométricas, situadas no Rio Bagagem. Tais estações proporcionaram o conhecimento de fatores tais como vazão e precipitação (Tabela 1), registrados durante um período de seis anos.

Para a bacia fonte, além dos dados de vazões diárias e precipitações anuais médias, também foram usadas características fisiográficas, tais como: área de drenagem (A), comprimento (L) e

desnível (H) entre a nascente e um determinado ponto do rio (Tabela 1). Para obter informações do comprimento bem como área de drenagem, utilizou-se um mapa planialtimétrico da bacia do alto Rio Bagagem, digitalizado no programa *AutoCad*. Para a estimativa do desnível entre a nascente do rio e as estações fluviométricas, foi utilizado o programa *Google Earth*.

Tabela 1 - Estações fluviométricas para a bacia fonte, sítios de implantação de PCH para a bacia alvo e características morfoclimáticas dos Rios Bagagem e Jordão

Rio	Pontos/Coordenadas UTM (x,y)	Área de Drenagem A (km <sup>2</sup> )	Precipitação P (mm)	L(km)	H(m)
<b>Bagagem</b> (fonte)	Estação 18: Pontilhão	17,52	1439,3	2,17	30
	Estação 15: COPASA	91,00	1448,4	18,98	72
	Estação 10: Ponte Velha Romaria	262,42	1247,3	57,07	116
	Estação 9: Israel	289,95	1336,5	63,60	384
<b>Jordão</b> (alvo)	1 x = 806232,0 m y = 7931292 m	176,82	1495	26,345	814
	2 x = 805689,6 m y = 7936335 m	231,87		32,13	718
	3 x = 804519,1 m y = 7945151 m	402,07		44,48	630
	4 x = 805746,8 m y = 7950366 m	483,23		51,96	579

Para a bacia alvo foram escolhidos quatro pontos para implantação de PCH, distribuídos ao longo do Rio Jordão (Figura 2). A escolha desses sítios levou em consideração a existência de vales fechados e de trechos de talvegue com maiores declividades. Na eventual implantação de PCH nesses locais, estas características contribuem para reduzir o comprimento da barragem e a área de alagada a montante.

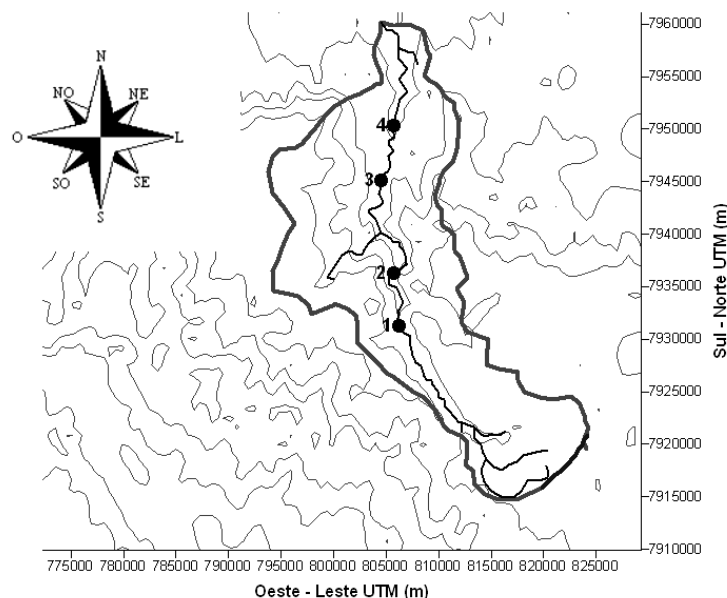


Figura 2 – Bacia do Rio Jordão e sítios selecionados para implantação de PCH

Na determinação das características fisiográficas para o Rio Jordão, foram utilizadas ferramentas diversas. Primeiramente construiu-se um modelo digital de terreno a partir de interpolação espacial realizada no programa *Surfer*, introduzindo como amostragem, coordenadas e cotas altimétricas coletadas no programa *Google Earth*. Feito isto, delimitou-se a bacia do rio utilizando um gráfico de vetores, gerado pelo *Surfer*, que ilustra o direcionamento do escoamento

superficial na região. Delimitada tal bacia, calcularam-se as áreas de drenagem, o desnível e o comprimento entre a nascente do rio e os possíveis sítios de implantação da PCH..

Para a precipitação na bacia do Rio Jordão, devido à ausência de dados de chuvas, foi adotada uma precipitação média anual de 1495 mm, sendo retirada do sistema Hidroweb, no site da Agência Nacional de Águas (ANA), para a estação 01848010, próxima da cidade de Araguari.

## METODOLOGIA

### Calibração das Curvas de Permanência de Vazões (CPV) para a Bacia do Alto Rio Bagagem

A curva de permanência de vazões (CPV) é o complemento da função de distribuição de vazões diárias, mensais, anuais, ou de qualquer outro intervalo de tempo, que representa de modo gráfico, a relação entre a amplitude e frequência com que essas vazões são igualadas ou superadas em um dado período de tempo. Tal curva fornece uma concisa, porém simples, visão gráfica do comportamento hidrológico de uma bacia, quanto à variabilidade das vazões ao longo do tempo.

Segundo Tucci (1993), o ajuste de uma função matemática a uma curva de permanência empírica permite uma sintetização de informações, facilitando os estudos sobre regionalização da mesma.

Utilizando-se dos dados de vazões diárias coletados no Sistema de Informações Hidrológicas ([http://hidro web.ana.gov.br](http://hidro.web.ana.gov.br)) da Agência Nacional de Águas (ANA), foi possível construir uma CPV para cada uma das quatro estações analisadas. Para interpolação dos dados das CPV, foram testadas seis funções matemáticas: exponencial, logarítmica, quadrática, cúbica, de quarto e quinto grau. Nesse sentido, o uso de polinômios de quinto grau (Equação 1) gerou linhas de tendência mais representativas do que as demais funções, apresentando coeficientes de determinação mais próximos da unidade.

$$Q = a - b \cdot D + c \cdot D^2 - d \cdot D^3 + e \cdot D^4 - f \cdot D^5 \quad (1)$$

Na Equação (1),  $Q$  é a vazão,  $D$  é o percentual de tempo igualado ou excedido (frequência acumulada) e  $a, b, c, d, f$  são constantes positivas do modelo, as quais foram determinadas pelo método dos mínimos quadrados, utilizando a ferramenta *solver* e também as linhas de tendência do programa *Excel*. Na Figura 3 é possível observar as curvas de permanência de vazões para os quatro postos fluviométricos do Rio Bagagem. A Tabela 2 resume os valores dos parâmetros  $a, b, c, d, e, f$  da função polinomial de quinto grau, para as quatro estações analisadas na calibração.

Tabela 2 - Parâmetros das funções interpoladoras das CPV para as quatro estações do Rio Bagagem

Estação	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
Pontilhão (18)	$1,1335 \cdot 10^0$	$9,4722 \cdot 10^2$	$4,8138 \cdot 10^{-3}$	$1,0990 \cdot 10^{-4}$	$1,1127 \cdot 10^{-6}$	$4,1000 \cdot 10^{-9}$
COPASA (15)	$5,9657 \cdot 10^0$	$4,1441 \cdot 10^{-1}$	$1,8878 \cdot 10^{-2}$	$4,1763 \cdot 10^{-4}$	$4,2132 \cdot 10^{-6}$	$1,5700 \cdot 10^{-8}$
Ponte Velha Romaria (10)	$1,6629 \cdot 10^1$	$1,4979 \cdot 10^0$	$7,1486 \cdot 10^{-2}$	$1,5614 \cdot 10^{-3}$	$1,5337 \cdot 10^{-5}$	$5,5400 \cdot 10^{-8}$
Israel (9)	$2,5809 \cdot 10^1$	$2,1402 \cdot 10^0$	$8,9836 \cdot 10^{-2}$	$1,8641 \cdot 10^{-3}$	$1,8148 \cdot 10^{-5}$	$6,6000 \cdot 10^{-8}$

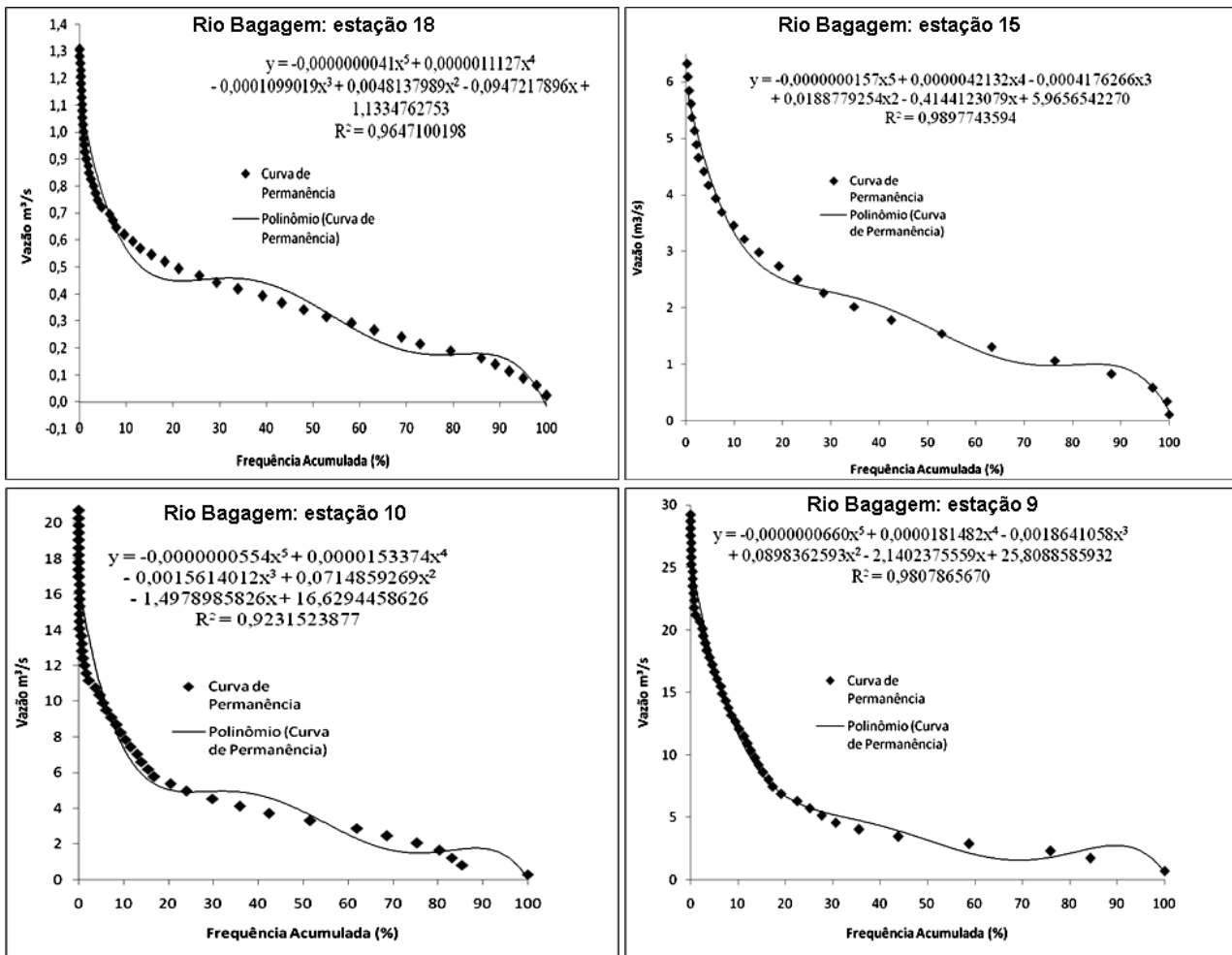


Figura 3 - Curvas de permanência de vazões e funções polinomiais de ajuste para as estações do Rio Bagagem

### Modelo de Regressão Utilizado na Regionalização

Os parâmetros *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f* da Equação (1) são interdependentes das condições climáticas e fisiográficas da bacia. Por conseguinte, a transferência das informações das estações adotadas, que serviram para calibrar o modelo supracitado, para a bacia sem dados de vazão (bacia alvo), foi feita pela regionalização destes seis parâmetros. Nesse sentido, foram consideradas como características morfoclimáticas: a área de drenagem, o comprimento, o desnível do rio e a precipitação média anual, simbolizadas respectivamente por *A* (km<sup>2</sup>), *L* (km), *H* (m) e *P* (mm). Tomando por base as quatro estações da bacia do Rio Bagagem, construiu-se a matriz de correlação entre estes fatores morfoclimáticos (Tabela 3).

Tabela 3 – Matriz de correlação entre variáveis independentes

	P(mm)	A(km <sup>2</sup> )	H(m)	L(km)
P(mm)	1			
A(km <sup>2</sup> )	-0,854	1		
H(m)	-0,398	0,781	1	
L(km)	-0,850	0,999	0,784	1

Segundo Naghettini e Pinto (2007), para evitar a multi-colinearidade, elimina-se uma entre cada conjunto de duas variáveis independentes que apresentarem coeficiente de correlação superior a 0,85. Portanto, observando a Tabela 3, as variáveis  $A$  e  $L$  são multi-colineares. Diante disto, considerando que a área de drenagem tem efeito mais determinante na vazão, descartou-se da análise de regressão o comprimento do rio. Assim, o modelo genérico de regressão linear múltipla pode ser escrito como:

$$V = x_0 + x_1 \cdot P + x_2 \cdot A + x_3 \cdot H \quad (2)$$

Na Equação (2),  $V$  é a variável dependente que representa os parâmetros  $a, b, c, d, e, f$  das CPV;  $x_0, x_1, x_2$  e  $x_3$  são as constantes da regressão linear múltipla. Os valores de  $x_0, x_1, x_2$  e  $x_3$  (Tabela 4) foram determinados, para a bacia alvo, por intermédio do comando *regressão* em *análise de dados*, integrante do programa *Excel*.

Tabela 4 - Parâmetros das curvas de permanência de vazão

	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
$X_0$	$6,1776 \cdot 10^0$	$3,1265 \cdot 10^0$	$1,5875 \cdot 10^{-1}$	$3,2865 \cdot 10^{-3}$	$2,9977 \cdot 10^{-5}$	$9,8764 \cdot 10^{-8}$
$X_1$	$-4,7402 \cdot 10^{-3}$	$-2,2019 \cdot 10^{-3}$	$-1,1069 \cdot 10^{-4}$	$-2,2826 \cdot 10^{-6}$	$-2,0789 \cdot 10^{-8}$	$-6,8465 \cdot 10^{-11}$
$X_2$	$4,8735 \cdot 10^{-2}$	$3,0131 \cdot 10^{-3}$	$1,5404 \cdot 10^{-4}$	$3,6040 \cdot 10^{-6}$	$3,7008 \cdot 10^{-8}$	$1,3892 \cdot 10^{-10}$
$X_3$	$3,0823 \cdot 10^{-2}$	$2,8202 \cdot 10^{-3}$	$8,9492 \cdot 10^{-5}$	$1,5191 \cdot 10^{-6}$	$1,3606 \cdot 10^{-8}$	$4,8070 \cdot 10^{-11}$

Finalmente, tendo em mãos as características morfoclimáticas de cada um dos quatro sítios escolhidos ao longo do Rio Jordão, foi possível calcular os parâmetros regionalizados  $a, b, c, d, e, f$  do modelo polinomial de quinto grau e determinar a vazão para 95% de permanência, tomada como referência para avaliação preliminar da energia firme e da potência instalada (ELETROBRÁS, 2000). Estes resultados são discriminados na Tabela 5.

Tabela 5 - Determinação da vazão de referência para cada sítio no Rio Jordão, através dos parâmetros da equação polinomial

Equação de regionalização da CPV: $Q = a - b.D + c.D^2 - d.D^3 + e.D^4 - f.D^5$								
D (%)	sítio	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$Q_{95} (m^3/s)$
95	1	32,79787	2,66303	0,093346	0,001748	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-8}$	0,8884
	2	32,52176	2,558164	0,093235	0,0018	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$6,31 \cdot 10^{-8}$	1,4311
	3	38,10405	2,822818	0,111577	0,00228	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-8}$	2,1842
	4	40,48742	2,923532	0,119515	0,002495	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$9,14 \cdot 10^{-8}$	2,5834

### Energia Firme e Potência Instalada

Calculadas as vazões de referência para todos os pontos escolhidos, foram estimadas a energia firme e a potência instalada:

$$EF_e = \frac{\mu \cdot 9,81 \cdot Q \cdot H_{liq}}{1000} \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$Pot = \frac{EF_e}{F_c} \quad (4)$$

Nas Equações (3) e (4),  $EF_e$  é a energia firme estimada em MW médios, considerando-se  $Q=Q_{95}$  e a queda líquida ( $H_{liq}$ ) constantes durante o funcionamento da usina. Adota-se 1 MW médio = 8760 MWh por ano, durante a vida útil do empreendimento. Ainda nas referidas equações,  $\mu$  é o rendimento do conjunto turbina-gerador, sugerindo-se o valor final de 0,85 (ELETROBRÁS, 2000);  $\Delta t$  é o intervalo de tempo igual a 1 s. A queda líquida ( $H_{liq}$ ) é igual à queda bruta menos as perdas hidráulicas, que foram adotadas como 3% da queda bruta para casas de força ao “pé” da barragem, conforme as Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2000). Na Equação (4),  $F_c$  é o fator de capacidade, adotado como 0,55 para a fase de estudos preliminares e de viabilidade de implantação de PCH.

## RESULTADOS E ANÁLISES

Dois parâmetros considerados no presente trabalho, para a locação propícia da PCH, foram a área inundada e o comprimento da barragem. Considerando uma única turbina, o aumento da potência instalada depende do aumento da queda bruta do sistema, o que ocorre com a elevação do nível de água e com a formação de reservatórios paulatinamente maiores a montante da barragem. Neste contexto, foram estimados tamanhos distintos de reservatórios e consequentemente de comprimentos de barragem, para cada sítio analisado. Na determinação de tais parâmetros, foram adotadas variações crescentes de cinco metros no nível de água a montante da barragem, culminando em reservatórios e comprimentos de barramento cada vez maiores. Para tanto, foram determinadas as potências relativas a cada aumento realizado, com intuito de se analisar o acréscimo da mesma.

Visando à escolha do local mais adequado para o posicionamento do eixo da barragem, observou-se a maior potência instalada com menores áreas alagadas e comprimentos de barragem. Isto se deve ao fato de que, quanto mais reduzida for a área alagada, menores serão os impactos ambientais, assim como menores serão os gastos na construção do reservatório e da barragem. Os resultados dessas análises são apresentados na Figura 4.

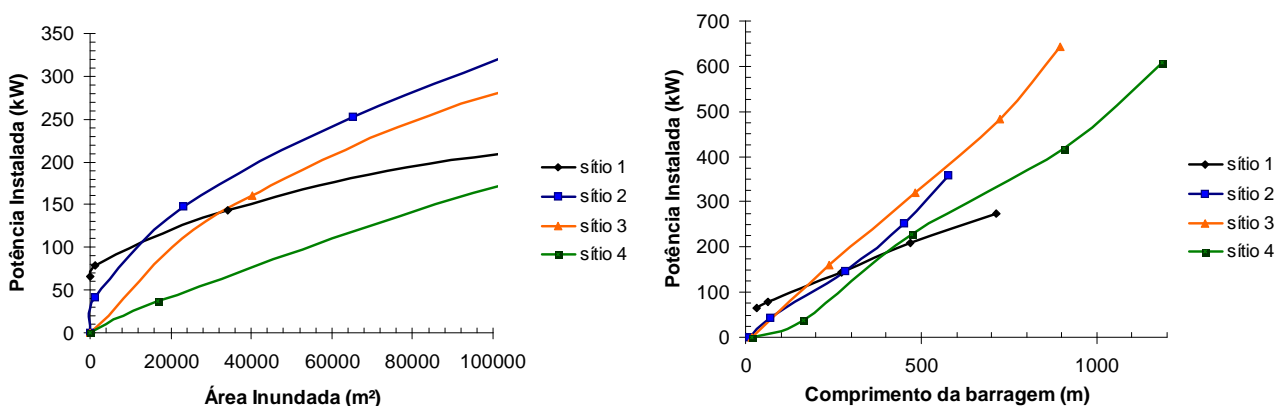


Figura 4 - Gráficos com as relações entre *potência instalada x área do reservatório* e *potência instalada x comprimento da barragem*, para todos os sítios de implantação selecionados

Analisando os resultados gráficos, fica claro que quanto mais vertical for a curva de variação, mais apropriado será o ponto para a locação do eixo da barragem, uma vez que consistirá em um menor impacto ambiental e um menor gasto na construção da usina. Neste caso, nota-se que os pontos se revezam com relação à sua maior conveniência, uma vez que há interseções entre as

curvas. Isso se deve ao fato de que a qualificação de cada ponto, como sítio de implantação da barragem, é alterada à medida que a potência instalada aumenta.

Nas Tabelas 6 e 7 estão ranqueados os pontos na ordem do mais para o menos conveniente na localização da barragem. Tal ranqueamento foi feito estipulando-se faixas de potência instalada.

Tabela 6 - *Ranking* de sítios mais convenientes, considerando o critério de menor área de reservatório

Faixas aproximadas de Potência Instalada	1°	2°	3°	4°
<100 kW (PCH micro)	Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3	Sítio 4
100-143	Sítio 2	Sítio 1	Sítio 3	Sítio 4
>143 kW	Sítio 2	Sítio 3	Sítio 1	Sítio 4

Tabela 7 - *Ranking* de sítios mais convenientes, considerando o critério de menor comprimento de barragem

Faixas aproximadas de Potência Instalada	1°	2°	3°	4°
<53 kW	Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3	Sítio 4
53-100 kW	Sítio 1	Sítio 3	Sítio 2	Sítio 4
100-143 kW	Sítio 3	Sítio 1	Sítio 2	Sítio 4
143-198 kW	Sítio 3	Sítio 2	Sítio 1	Sítio 4
>198 kW	Sítio 3	Sítio 2	Sítio 4	Sítio 1

Ao observar as Tabelas 6 e 7, além da Figura 4, verifica-se que o ponto 1 é mais conveniente para ambas as análises até uma potência instalada de aproximadamente 100 kW, a partir de onde torna-se menos vantajoso do que os pontos 2 e 3, respectivamente para os critérios de menor área inundada e menor comprimento de barragem.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho abordaram-se procedimentos para os estudos hidrológicos, enfatizando que, para fins de projeto básico e aceite da ANEEL, a análise também deve incluir aspectos socioeconômicos e ambientais. Dentre os modelos matemáticos utilizados, o de maior relevância foi o de regionalização da curva de permanência de vazões, que é de importância fundamental na determinação de vazões de referência em bacias carentes de séries históricas.

Dessa forma, considerando exclusivamente aspectos hidrológicos para a bacia alvo do Rio Jordão e a seleção prévia de possíveis sítios de implantação, concluiu-se que, para determinar ao certo a melhor localização da PCH, deve-se fixar um valor de potência instalada desejável, levando em conta uma única turbina. Feito isto, pode-se analisar finalmente o local que terá menor área inundada para reservatório e menor comprimento de barragem, visando a menores impactos ambientais e gastos com construção. Nesta linha de raciocínio, concluiu-se que, para potências instaladas superiores a 100 kW, visando a um reservatório menor, deve-se optar pelo sítio 2. Para potências superiores a 100 kW, visando a um comprimento de barragem mais reduzido, deve-se optar pelo sítio 3. Todavia, para potências instaladas inferiores a 100 kW, o sítio 1 é o mais conveniente para ambos os critérios.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e à CNPq, instituições brasileiras de fomento à pesquisa.



## REFERÊNCIAS

ANEEL (2010). Agência Nacional de Energia Elétrica. BIG – Banco de Informações de Geração. Disponível em <<http://aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaocapacidadeBrasil.asp>> Acesso em 22 de Janeiro de 2013.

ELETROBRÁS (2000). Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, Rio de Janeiro, 2000.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). Correlação e regressão. In *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

TUCCI, C. E. M. (1993). Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade – UFRGS, 1993. Capítulo 15, p. 573-619.