



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

GGH 28
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA

PROPOSTA DE AJUSTE DOS COEFICIENTES POLINOMIAIS DAS CURVAS CHAVES DE EMPREENDIMENTOS HIDRELÉTRICOS E SUAS IMPLICAÇÕES

Hugo Leonardo Marques da Silva

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO - CHESF

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo demonstrar que a escolha dos pontos notáveis para construção das curvas chaves de empreendimentos hidrelétricos, e o ajuste dos coeficientes dos polinômios trazem implicações diretas sobre a energia firme do empreendimento. A literatura sobre o assunto é escassa e faz-se necessário para os agentes do setor de geração uma maior definição desta metodologia, em virtude de possíveis penalizações que porventura venham ocorrer pela diminuição da energia firme e, conseqüentemente, da energia assegurada de novos empreendimentos hidráulicos em estudo.

PALAVRAS-CHAVE

Energia firme, Energia assegurada, Curvas Chaves, Polinômios, Ajuste Polinomial.

1.0 - INTRODUÇÃO

A energia produzida por um empreendimento hidrelétrico não é diretamente comercializada, ela faz parte do montante de geração hidráulica total do sistema, que é partilhada pelos empreendimentos participantes do MRE, mecanismo de realocação de energia, proporcionalmente a sua energia assegurada. A energia que pode ser comercializada por empreendimentos hidrelétricos é a sua energia assegurada, e esta tem uma metodologia própria de cálculo.

A energia assegurada de empreendimentos hidrelétricos é definida como um percentual da oferta hidráulica do sistema interligado. Esta oferta é obtida através de simulações estáticas com o NEWAVE, para um percentual de risco de 5% de ocorrer qualquer déficit.

A partir de uma configuração hidráulica e térmica estabelecida é definida a carga (mercado) que esta configuração pode atender com o risco de 5% de haver qualquer déficit de energia, esta carga é definida como carga crítica ou energia assegurada do sistema. Após este cálculo, a oferta hidráulica será rateada, proporcionalmente, para cada empreendimento hidráulico utilizando um fator de rateio, que será a percentual de participação da energia firme do empreendimento hidráulico na energia firme do sistema.

A atribuição de cálculo da energia firme e assegurada dos empreendimentos hidráulicos é de responsabilidade do Ministério de Minas e Energia, entretanto, a definição dos polinômios que iram compor os estudos de inventário e viabilidade do empreendimento é definida pelo empreendedor que realizou os estudos.

2.0 - ASPECTOS RELEVANTES

2.1 Polinômios característicos

Os polinômios que caracterizam o comportamento hidráulico de um empreendimento hidrelétrico são obtidos através de regressão numérica dos pontos notáveis obtidos no local do aproveitamento. São polinômios de quarto grau e definem:

- A cota do reservatório em metros (m) a partir de seu volume em hectômetros cúbicos (hm³);
- A área do reservatório em quilômetros quadrados (km²) a partir da sua cota em metros (m);
- A nível de jusante em metros(m)a partir da vazão defluente em metros cúbicos por segundo (m³/s).

A expressão abaixo descreve um polinômio de quarto grau com cinco elementos. Os coeficientes A₀, A₁, A₂, A₃, A₄ são obtidos por regressão polinomial e definem a curva característica.

$$Y = A_0 \times X^0 + A_1 \times X^1 + A_2 \times X^2 + A_3 \times X^3 + A_4 \times X^4$$

2.2 Energia firme

A energia firme de empreendimentos hidrelétricos é definida como a energia média fornecida ao sistema no seu período crítico. O período crítico é definido como o período, onde os reservatórios partindo cheios e sem reenchimentos totais intermediários, são deplecionados até a ocorrência de déficit no mercado. A simulação para o cálculo da energia firme é feita de maneira estática e sem considerar as restrições de transmissão, e sua simulação se dá através do MSUI modelo de simulação de usinas individualizadas.

2.3 Modelo de simulação a usina individualizada

O Modelo de Simulação de Usina Individualizada, MSUI, foi desenvolvido pela Eletrobrás e utiliza, no cálculo da energia firme de empreendimentos hidrelétricos, três polinômios chaves que definem a performance operativa da usina. Considera os subsistemas como único, ou seja, não há restrições de transmissão, e como fonte de geração apenas hidráulica. É o programa oficial utilizado na simulação da energia firme dos empreendimentos hidráulicos.

2.4 Energia assegurada

A Energia Assegurada de uma usina corresponde à fração a ela alocada da Energia Assegurada do Sistema. A determinação da Energia Assegurada independe da sua geração real e está associada às condições no Longo Prazo que cada usina pode fornecer ao sistema, assumindo um critério específico de risco do não atendimento do mercado (déficit), considerando a variabilidade hidrológica à qual está submetida.

A Energia Assegurada do Sistema corresponde à máxima carga que pode ser suprida a um risco pré-fixado (5%) de não atendimento da mesma, obtida por meio de simulações da operação com o modelo NEWAVE e MSUI, utilizando séries sintéticas e históricas, respectivamente, de energia afluenta, conforme metodologia aprovada pela ANEEL.

Este parâmetro estabelece os montantes contratuais alocados aos empreendimentos de geração e serve para lastrear os contratos de energia no celebrados no ACR e ACL.

2.5 Comercialização de energia elétrica por empreendimentos hidrelétricos

A receita bruta para remunerar o investimento de empreendimentos hidrelétricos advem da comercialização da energia assegurada do empreendimento, esta energia poderá ser comercializada nos dois ambientes de contratuais existentes:ACL, Ambiente de contratação livre, onde a compra e venda é feita livremente entre os agentes e o ACR, ambiente de contratação regulada, neste os contratos de compra e venda de energia são celebrados entre os agentes através de leilões conduzidos pelo ANEEL. Toda contratação dos agentes de distribuição são realizadas no ACR.

Toda receita do empreendimento advem de contratos de compra e venda realizadas nestes ambientes até a totalização de sua energia assegurada. Conforme dito anteriormente, o cálculo da energia firme traz impactos diretos sobre esta receita.

2.6 Policope

O policope foi desenvolvido pela Eletrobrás com o intuito de proporcionar um melhor ajuste dos coeficientes polinomiais. Utiliza a primeira e a segunda derivada dos polinômios como parâmetros de definição do crescimento e concavidade.

3.0 - ESTUDO DE CASO

3.1 Metodologia utilizada

Foi escolhidos, arbitrariamente, um aproveitamento em estudo do banco de dados do potencial hidrelétrico, SIPOT, e seus parâmetros operativos utilizados como referência, ver Tabela 1. A metodologia baseia-se na utilização do policope programa de ajuste de curva, desenvolvido pela Eletrobrás, com o intuito de obter novos coeficientes a partir dos pontos de projeto, ver Tabela 4, 5 e 6, medidos no local do aproveitamento, e compará-los com os coeficientes oficiais obtidos do SIPOT, ver Tabela 2. A partir destes novos coeficientes, foi feita a comparação do erro médio dos pontos obtidos com o polinômio calculado e o polinômio oficial, em relação aos pontos de projeto. Por fim, foi realizada a simulação da energia firme do empreendimento utilizando os coeficientes dos polinômios oficiais e os coeficientes dos polinômios calculados com o programa.

Tabela 1 – Níveis operativos, SIPOT.

N.A mínimo operativo	380,5m
N.A máximo operativo	392,5m
N.A máximo maximorum	393,5m

Tabela 2– Coeficientes dos polinômios, SIPOT.

	<u>AO</u>	<u>A1</u>	<u>A2</u>	<u>A3</u>	<u>A4</u>
VolumeXCota	3,74179000E+02	1,39669000E-03	-5,35159000E-08	1,15598900E-12	-9,54598900E-18
CotaxÁrea	-5,03710000E+05	4,91378900E+03	-8,96688900E+00	-1,89169000E-02	4,65379000E-05
VazãoxNAjusante	3,59653800E+02	1,96401000E-03	-2,96873000E-07	2,50828000E-11	-7,70229900E-16

3.2 Coeficientes dos novos polinômios

Os coeficientes dos polinômios calculados, ver Tabela 3, foram obtidos a partir do intervalo de pontos entre o NA mínimo, (380,50 m) e NA máximo (392,50 m).

Tabela 3 – Coeficientes dos novos polinômios

	<u>AO</u>	<u>A1</u>	<u>A2</u>	<u>A3</u>	<u>A4</u>
VolumeXCota	3,74364400E+02	1,40475000E-03	-5,97515200E-08	1,53791700E-12	-1,57315600E-17
CotaxÁrea	-1,41164000E+07	1,00488600E+05	-2,03536900E+02	1,16544100E-02	2,24589700E-04
VazãoxNAjusante	3,60609600E+02	1,24821000E-03	-1,27803200E-07	9,30237400E-12	-2,63113900E-16

3.2.1 Polinômio Volume x Cota

Este polinômio determina a partir da abscissa x, volume, a cota, em metros, do reservatório. Os pontos do projeto, ver Tabela 4, são utilizados com parâmetro na definição do erro. Os pontos calculados pelo polinômio oficial e polinômio ajustado apresentaram um erro médio de 0,017% e 0,002% em relação aos pontos medidos.

Tabela 4 – Erro médio dos pontos calculados em relação aos medidos

POLINÔMIO VOLUME X COTA				ERRO MÉDIO %	
PONTOS		VALORES CALCULADOS		POLICOPE	POL. OFICIAL
VOL (hm ³)	COTA (m)	POLICOPE (m)	POL. OFICIAL (m)	0,002%	0,017%
4916,4	380	380,00	379,88	0,000%	0,031%
6336,05	381,25	381,23	381,16	0,005%	0,024%
7996,48	382,5	382,50	382,48	0,000%	0,006%
9889,76	383,75	383,75	383,78	0,000%	0,009%
12089,74	385	385,00	385,08	0,001%	0,021%
14692,94	386,25	386,25	386,37	0,000%	0,031%
17682,12	387,5	387,49	387,60	0,004%	0,026%
21083,43	388,75	388,73	388,79	0,006%	0,009%
24926,84	390	390,00	389,96	0,000%	0,010%
29217,84	391,25	391,29	391,18	0,011%	0,018%
34115,8	392,5	392,50	392,51	0,000%	0,003%

3.2.2 Polinômio Cota x Área

Este polinômio determina a partir da abscissa x, cota, a área, em km², do reservatório. Os pontos do projeto, ver Tabela 5, são utilizados com parâmetro na definição do erro. Os pontos calculados pelo polinômio oficial e polinômio ajustado apresentaram um erro médio de 1,111% e 1,563% em relação aos pontos medidos. É importante salientar que os pontos de projeto, ver Tabela 5, foram usados no ajuste dos coeficientes dos polinômios.

Tabela 5 – Erro médio dos pontos calculados em relação aos medidos

POLINÔMIO COTA X ÁREA				ERRO MÉDIO %	
PONTOS		VALORES CALCULADOS		POLICOPE	POL. OFICIAL
COTA (m)	ÁREA (km ²)	POLICOPE (km ²)	POL. OFICIAL (m)	1,111%	1,563%
380	1042,25	1041,11	1081,42	0,109%	3,758%
381,25	1229,2	1228,56	1245,14	0,052%	1,297%
382,5	1427,5	1433,70	1440,06	0,434%	0,880%
383,75	1601,77	1660,68	1666,79	3,678%	4,059%
385	1918,22	1913,68	1925,95	0,237%	0,403%
386,25	2246,9	2196,87	2218,14	2,227%	1,280%
387,5	2535,8	2514,45	2543,99	0,842%	0,323%
388,75	2906,31	2870,64	2904,12	1,227%	0,075%
390	3243,16	3269,66	3299,16	0,817%	1,727%
391,25	3622,44	3715,73	3729,73	2,575%	2,962%
392,5	4214,31	4213,12	4196,47	0,028%	0,423%

3.2.3 Polinômio Vazão Defluente x Cota Jusante

Este polinômio determina a partir da abscissa x, vazão, a cota, em metro, do nível de jusante. Os pontos do projeto, ver Tabela 5, são utilizados com parâmetro na definição do erro. Os pontos calculados pelo polinômio oficial e polinômio ajustado apresentaram um erro médio de 0,005% e 0,011% em relação aos pontos medidos.

Tabela 5 – Erro médio dos pontos calculados em relação aos medidos

POLINÔMIO VAZÃO DEFLUENTE X NA JUSANTE				ERRO MÉDIO %	
PONTOS		VALORES CALCULADOS		POLICOPE	POL. OFICIAL
VAZÃO (m³/s)	COTA (m)	POLICOPE (m)	POL. OFICIAL (m)	0,005%	0,011%
2000	362,66	362,67	362,58	0,001%	0,021%
4500	364,41	364,38	364,45	0,009%	0,011%
7000	365,6	365,64	365,61	0,012%	0,003%
9500	366,78	366,77	366,75	0,004%	0,008%
13000	368,16	368,16	368,12	0,000%	0,010%

3.2.4 Análise do erro obtido

O erro médio obtido como os novos coeficientes dos polinômios, indicou um melhor ajuste da curva em relação ao polinômio oficial constante no SIPOT. Em todos os três polinômios, o erro médio percentual apresentou-se menor, indicando uma curva mais próxima dos pontos medidos. A princípio, em termos percentuais isto não representou um diferencial relevante, em decorrência dos valores serem pequenos. Entretanto, comparando os valores dos erros entre si, ver Tabela 6, percebe-se que estes valores são significativos.

Tabela 6 – Erro médio dos pontos calculados em relação aos medidos

POLINÔMIO	RELAÇÃO ENTRE OS ERROS MÉDIOS
VOLUME X COTA	6,8
COTA X ÁREA	1,4
VAZÃO X NA JUSANTE	2,0

3.3 Cálculo da energia firme

A energia firme foi calculada utilizando o MSUI e o dec de placa 2003, este dec foi utilizado pelo Ministério de Minas e Energia para o cálculo da energia assegurada para o período após 2002.

A energia firme foi calculada utilizando-se o polinômio oficial constante no SIPOT, e o novo polinômio obtido com o ajuste proporcionado pelo policope. As energias firmes foram comparadas, ver Tabela 6, mostrando que o novo ajuste dos coeficientes traria um incremento de aproximadamente 43 MW médios de energia firme.

Tabela 7 – Energia firme

POL. REFERÊNCIA	POL. CALCULADO	DIFERENÇA	
ENERGIA FIRME MW médio	ENERGIA FIRME MW médio	MW	%
517,5	560,2	42,8	8,26%

4.0 – CONCLUSÃO

A energia firme demonstrou-se extremamente sensível ao ajuste dos coeficientes polinomiais. O programa utilizado, policope, ajustou os coeficientes de uma melhor forma, possibilitando um acréscimo de energia firme.

Este trabalho pretendeu mostrar a importância de se fazer um ajuste bem feito nos coeficientes, e o cuidado na obtenção dos pontos para o cálculo da energia firme. E este cuidado deve-se ao fato de que estes polinômios estão diretamente relacionados com a futura receita do empreendimento.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CCEE - "Regras de Mercado". Online no site da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE: [http:// www.ccee.org.br/](http://www.ccee.org.br/) - setembro de 2006.
- (2) Ministério das Minas e Energia (MME) - "Proposta de modelo institucional do setor elétrico" - julho de 2003.
- (3) Cepel - "Programação Dinâmica Dual Estocástica aplicada ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação do Processo Estocástico de Afluências nos Modelos Auto-regressivos Periódicos". Relatório técnico 237/93 - 1993.
- (4) EPE - "Plano Decenal de Expansão – PDEE 2006/2015. Online no site da Empresa de Pesquisa Energética - EPE: [http:// www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) - agosto de 2006.
- (5) ONS - "Procedimentos de rede". Online no site do Operador Nacional do Sistema - ONS: <http://www.ons.org.br/> - setembro de 2006.
- (6) SILVA, Edson Luiz da. Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica. Editora Sagra Luzzatto, 2001.
- (7) EPE - "Estudo para Licitação da Geração". Online no site da Empresa de Pesquisa Energética - EPE: [http:// www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/) - agosto de 2006.
- (8) Cepel - "Modelo de Simulação de Usinas Individualizadas". Manual de Referência-1993.
- (9) ELETROBRÁS - "Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas", 1997.

6.0 – DADOS BIOGRÁFICOS

Hugo Leonardo Marques da Silva
Natural de Recife-PE, 1976.

Graduação em Engenharia Elétrica / Eletrotécnica: UPE – Universidade de Pernambuco, 2003.

Empresa: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, desde 2005

Engenheiro do Departamento de Estudos para Comercialização de Energia Elétrica