



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

GPL 08
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GPL

A GERAÇÃO DE ENERGIA DO AHE BELO MONTE

Flávio Corga Cardinot

Lilian Laubenbacher Sampaio

Paulo Fernando Vieira Souto Rezende *

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. – ELETROBRÁS

Paulo Cesar Magalhães Domingues

CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE

RESUMO

O presente artigo, sem entrar nas questões ambientais, apresenta o cálculo da produção de energia para o aproveitamento Belo Monte, descrevendo os conceitos básicos para o dimensionamento da capacidade instalada, a modelagem e metodologia adotadas e os resultados dos estudos energéticos.

Serão apresentados os cálculos efetuados utilizando o modelo MSUI – Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas em sua versão 3.0, desenvolvido pela ELETROBRÁS, que permitirão contrapor as conclusões apresentadas em publicações e teses, que não atentaram para a existência de um Sistema Interligado Nacional, onde estará inserido o aproveitamento de Belo Monte.

PALAVRAS-CHAVE: AHE Belo Monte, Energia firme, modelo matemático.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro é um sistema de geração hidrotérmico, com forte predominância de geração hidrelétrica. A capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional – SIN é de 82,1 GW^[1], sendo que a parcela hidrelétrica, de 69,8 GW, representa 85% desse total.

O Brasil tem um dos maiores potenciais hidrelétricos do mundo, estimado em cerca de 260 GW^[2] de capacidade instalada, ou seja, apenas 29% do potencial hidrelétrico já está sendo utilizado.

Tal potencial, somado a menores custos de operação, torna a hidreletricidade a principal fonte de energia contemplada nos estudos de planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro.

Como há a necessidade de ofertar energia elétrica capaz de atender o mercado crescente, dentro de uma perspectiva de crescimento do país, a viabilidade de grandes empreendimentos hidrelétricos, por vezes chamados estruturantes, se mostra de fundamental importância no atendimento à demanda por energia.

O Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte, dentro desse contexto, aparece como uma obra de fundamental importância, necessária à expansão do sistema, e vem constando há décadas nos programas oficiais de expansão da oferta do sistema elétrico brasileiro.

O Relatório Final dos Estudos de Viabilidade do CHE Belo Monte^[3], elaborado pela ELETROBRÁS e pela ELETRONORTE, foi encaminhado à ANEEL em 28 de fevereiro de 2002.

(*) Av. Presidente Vargas, 409 – 15º andar – CEP 20071-003 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2514-5789 – Email: paulofr@eletrobras.com

De lá para cá, por várias vezes, a capacidade de geração de energia elétrica do Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte, apresentada nos Estudos de Viabilidade, foi contestada por diversos órgãos e pessoas, tornando-se importante enfatizar os conceitos e premissas que levaram aos números encontrados, de acordo com as metodologias vigentes no país.

2.0 - OBJETIVO

O objetivo do presente estudo é mostrar a geração de energia prevista para o AHE Belo Monte, apresentando conceitos básicos de estudos energéticos, de acordo com as metodologias vigentes no país, e fazer um comparativo com resultados apresentados em outros estudos que contestam esses valores.

3.0 - CONCEITOS BÁSICOS

Sistema Interligado Nacional - SIN: com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O SIN abrange as regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade instalada do país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica;

Operação do SIN: desde meados da década de 70, o sistema eletroenergético brasileiro é operado de forma coordenada, visando obter ganhos sinérgicos, minimizando os custos globais de produção de energia elétrica. Atualmente essa operação é feita pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Através das suas linhas de transmissão o SIN interliga a geração de cada bacia hidrográfica aproveitando a diversidade hidrológica e os volumes de água armazenada em cada reservatório;

Energia Hidráulica: de forma simplificada, a produção de energia hidráulica é proporcional ao produto entre vazão e altura de queda. A Figura 1 apresenta de forma esquemática a equação de produção de uma usina;

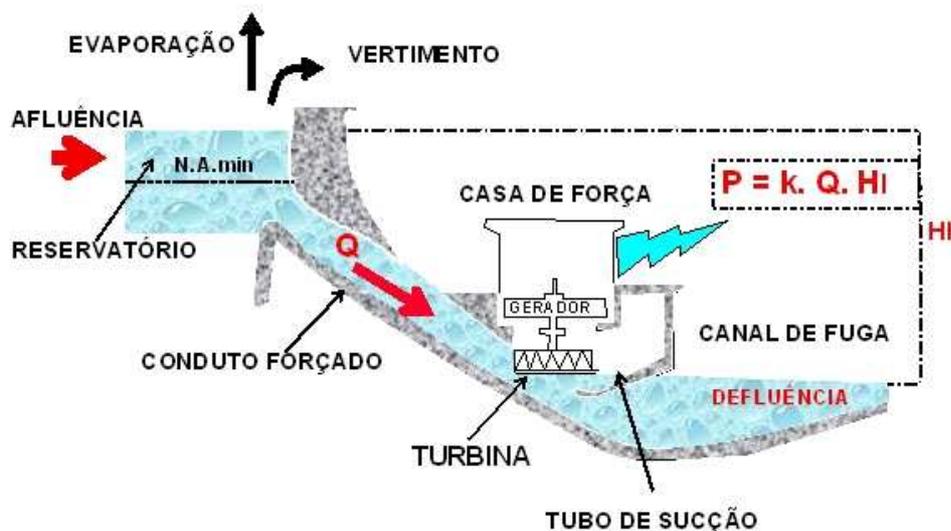


FIGURA 1: Esquema Simplificado de uma Usina Hidrelétrica

Onde:

Q = vazão (m³/s);
 HI = queda líquida (m);
 P = potência instalada (kW).
 $k = 10^{-3} \cdot g \cdot \eta \cdot \rho$

Sendo:

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²);
 η = rendimento do conjunto turbina/gerador (pu);
 ρ = peso específico da água (10³ kg/m³).

Usina a Fio d'Água: usina sem reservatório de regularização, de modo que toda vazão afluenta é defluída, ou seja, é turbinada e/ou vertida. Também chamada de usina com reservatório de compensação, o volume do reservatório é suficiente apenas para regularização de descargas semanais ou diárias;

Usina com Acumulação: usina hidrelétrica que dispõe de reservatório com capacidade de regularização mensal, anual ou até plurianual. Esses últimos atenuam bastante o efeito da variabilidade das afluências naturais, devido à capacidade de armazenamento em períodos úmidos e deplecionamento em períodos secos;

Energia Firme do Sistema: é o maior valor possível de energia capaz de ser produzido continuamente pelo sistema, com as mesmas características do mercado, sem a ocorrência de déficits, no caso de repetição das afluências do registro histórico;

Período Crítico: é o intervalo de tempo em que o armazenamento do sistema vai de seu nível máximo (todos os reservatórios cheios) até o seu nível mínimo (todos os reservatórios vazios), sem ocorrência de reenchimentos totais intermediários, no atendimento à energia firme do sistema. O Período Crítico do SIN atualmente adotado pelo setor elétrico é o compreendido entre junho de 1949 a novembro de 1956 (90 meses);

Energia Firme de uma Usina: é o valor médio de sua geração de energia ao longo do período crítico do sistema, com este atendendo a sua energia firme;

Ganho de Energia Firme de uma Usina: é a diferença entre as energias firmes do sistema com e sem a usina. Este valor é utilizado nos estudos energéticos para dimensionamento da potência instalada e dos níveis d'água operativos do reservatório.

4.0 - MODELO DE SIMULAÇÃO

O Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – MSUI, desenvolvido na Eletrobrás, tem, como uma de suas principais funções, o cálculo de Energia Firme, seja calculando o Período Crítico ou para um Período Crítico fornecido. Essa função o torna um dos modelos mais usados em dimensionamento de usinas hidrelétricas e o modelo oficialmente utilizado, junto com o Newave, no cálculo das Energias Asseguradas de empreendimentos hidrelétricos.

O MSUI tenta representar com máximo rigor as características das usinas hidráulicas, retratando o comportamento do sistema no caso de ocorrência de uma repetição das vazões naturais registradas no passado, subordinado a um conjunto de parâmetros definidores de prioridades de esvaziamento/armazenamento, permitindo, como principais objetivos:

- A convergência da carga máxima garantida de uma determinada configuração de usinas e cálculo do respectivo período crítico;
- A avaliação do comportamento de uma usina individualizada através de seus parâmetros característicos.

A operação do sistema é simulada mês a mês, tendo por objetivo atender o mercado mensal de energia, maximizando a eficiência das usinas hidrelétricas, evitando qualquer desperdício e distribuindo a reserva de água de forma a otimizar a produção de energia e a utilização dessa reserva.

5.0 - DADOS CARACTERÍSTICOS DO AHE BELO MONTE

A Tabela 1 apresenta os dados do AHE Belo Monte utilizados nas simulações energéticas e constantes dos Estudos de Viabilidade^[3] entregues à ANEEL em fevereiro de 2002.

TABELA 1 – Dados do AHE Belo Monte utilizados nas simulações energéticas

Dados Físico-operativos	Casa de Força Principal (sítio Belo Monte)	Casa de Força Secundária (sítio Pimental)
Potência Instalada	11.000 MW	181,3 MW
Nº de Unidades	20	7
Rendimento Turbina/Gerador	92 %	92 %
Queda de Referência	87,5 m	11,4 m
Perda Hidráulica	1,2 m	0,15 m
Vazão Mínima	Vide Tabela 2	
Canal de Fuga Médio	5,6 m	84,8 m
Volume Mínimo	3.540 hm ³	3.540 hm ³
Volume Máximo	3.540 hm ³	3.540 hm ³
Cota Mínima	96 m	96 m
Cota Máxima	96 m	96 m
Área Mínima	440 km ²	440 km ²
Área Máxima	440 km ²	440 km ²
Tipo de Turbina	Francis	Bulbo

Cabe destacar que o AHE Belo Monte se trata de uma usina a fio d'água, ou seja, toda vazão que chega será turbinada e/ou vertida.

O arranjo do AHE Belo Monte, mostrado na Figura 2, prevê o desvio do rio por canais até a casa de força principal. O trecho do rio Xingu entre a barragem principal e o canal de fuga da casa de força principal ficará com a vazão reduzida, o que levou a necessidade de se prever uma vazão remanescente ambiental neste trecho, conforme Tabela 2.

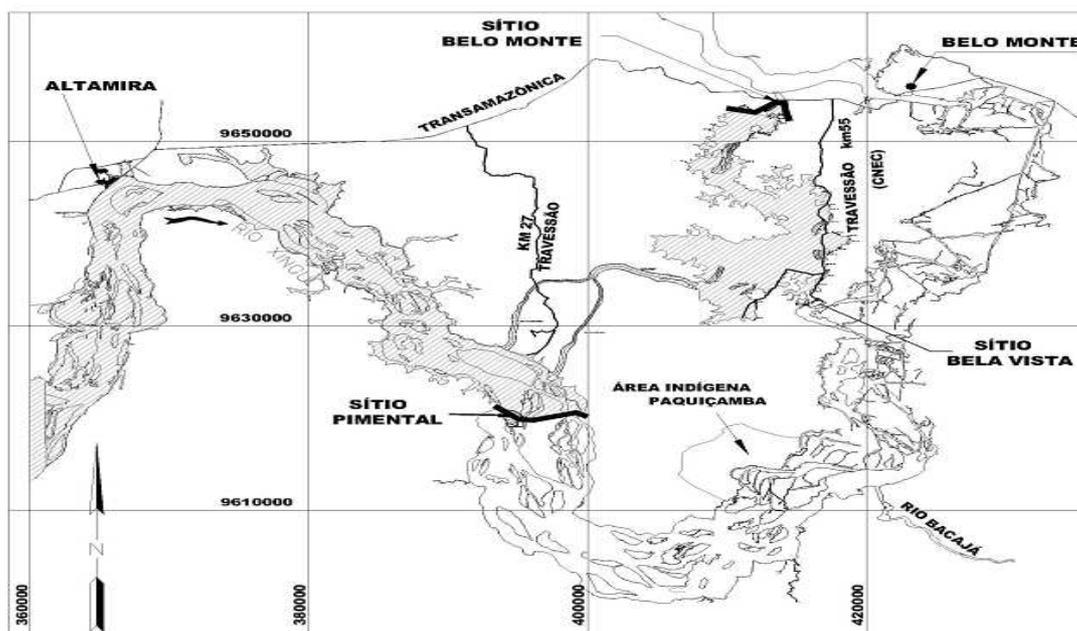


FIGURA 2: Arranjo Geral do AHE Belo Monte

TABELA 2 – Vazões Médias Mensais do Estirão de Jusante (m³/s)

jan	Fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
500	1.000	1.500	2.000	1.300	550	300	250	225	200	250	325

Na Tabela 3 são apresentados os polinômios “Vazão x Cota” e “Cota x Área” do reservatório, e o polinômio “Vazão x Nível de Jusante” para as duas casas de força.

TABELA 3: Polinômios

POLINÔMIOS DE BELO MONTE – CASA DE FORÇA PRINCIPAL					
	K0	K1	K2	K3	K4
PVC	9.6000000E+01	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
PCA	4.0000000E+02	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
PVN	2.9349100E+00	1.2598000E-04	1.1115100E-08	-4.943721E-13	6.3217000E-18
POLINÔMIOS DE BELO MONTE – CASA DE FORÇA SECUNDÁRIA					
	K0	K1	K2	K3	K4
PVC	9.7000000E+01	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
PCA	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
PVN	8.173670E+01	1.253043E-03	-1.798543E-07	1.200214E-11	-2.706087E-16

6.0 - GERAÇÃO DO AHE BELO MONTE

Para o cálculo do ganho de energia firme do Sistema Interligado Nacional, gerado pelo AHE Belo Monte, foram feitas simulações do Sistema com e sem o aproveitamento. O Período Crítico utilizado nos cálculos foi o do SIN, haja visto que o aproveitamento será integrado ao Sistema.

A diferença entre o total de energia firme do SIN entre as duas simulações representa o ganho de energia firme do AHE Belo Monte.

Para a casa de força secundária foi criado um novo posto considerando a vazão remanescente proposta no Estudo de Viabilidade mais a vazão que seria vertida na casa de força principal por exceder o engolimento máximo das turbinas, salvo alguns meses onde a vazão afluente é menor do que a vazão remanescente proposta, sendo a vazão no estirão, portanto, a própria vazão natural.

A Tabela 4 apresenta os valores calculados do ganho de energia firme proporcionado pelo AHE Belo Monte.

TABELA 4: Ganho de Energia Firme do AHE Belo Monte

AHE Belo Monte	Ganho de Energia Firme (MWmédios)
C.F. Principal	4.696,1
C.F. Secundária	76,6
Total	4.772,7

As Tabelas 5 e 6 apresentam a geração com permanência de 95%, média, mínima e máxima mensal local das casas de força principal e secundária do AHE Belo Monte para o período histórico.

TABELA 5: Geração na Casa de Força Principal

AHE BELO MONTE – CASA DE FORÇA PRINCIPAL												
GERAÇÃO MENSAL (MWméd)												
Médias Mensais												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Mín.	519,4	2402,6	6562,8	6369,2	4322,3	1886,3	918,8	545,3	207,5	200,1	290,6	691,2
Méd.	5830,0	8624,3	10210,	10361,	9409,2	5349,2	2102,1	1073,6	690,6	751,6	1324,7	2788,7
Máx.	10679,	10680,	10680,	10688,	10686,	10353,	3605,5	1704,5	1088,6	1567,6	3088,4	7654,3
P.95%	2753,3	4766,3	7765,2	8694,8	5770,6	2678,4	1396,3	725,3	427,6	407,5	762,0	1334,2
		Mínimo do Histórico		200,1								
		Média do Histórico		4876,3								
		Máximo do Histórico		10688,								
		Perm. 95% do Histórico		588,2								
		Méd. PC (jun/49-nov/56)		4623,5								

TABELA 6: Geração na Casa de Força Secundária

AHE BELO MONTE – CASA DE FORÇA SECUNDÁRIA												
GERAÇÃO MENSAL (MW _{méd})												
Médias Mensais												
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Mín.	64,8	126,5	125,2	129,9	141,6	71,2	39,3	33,3	30,1	26,8	33,3	42,2
Méd.	69,7	139,5	162,6	160,6	162,3	71,2	39,3	33,3	30,1	26,8	33,3	42,2
Máx.	164,9	166,0	164,9	164,9	165,4	71,2	39,3	33,3	30,1	26,8	33,3	42,2
P.95%	64,8	126,5	147,0	138,7	160,9	71,2	39,3	33,3	30,1	26,8	33,3	42,2

Mínimo do Histórico	26,8
Média do Histórico	80,9
Máximo do Histórico	166,0
Perm. 95% do Histórico	26,8
Méd. PC (jun/49-nov/56)	76,6

7.0 - DIVERGÊNCIAS COM OUTROS ESTUDOS

A energia firme do AHE Belo Monte já foi citada e, por vezes contestada, em diversos fóruns, teses, artigos e reportagens.

Os pontos mais divergentes com relação à energia calculada nos Estudos de Viabilidade tomaram como referência a tese “Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica”^[4] de dezembro de 2003, submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas por Marcelo Augusto Cicogna, sob orientação do Prof. Dr. Secundino Soares Filho, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Nessa tese, os estudos realizados mostram como energia firme para Belo Monte o valor de 1.172,0 MWmédios (pág. 183), bem diferente do valor apresentado nos Estudos de Viabilidade, de 4.772,7 MWmédios.

Alguns dos trabalhos que tomaram os resultados desta tese como referência são: o livro “TENOTÃ-MÕ - Alertas sobre as conseqüências dos projetos hidrelétricos no rio Xingu”^[5], coletânea de artigos organizados por A. Oswaldo Sevá Filho, em 2005; a tese de mestrado de Neidja Cristine Silvestre Leitão, intitulada “Avaliação Sócio-Econômica e Ambiental do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte”^[6], submetida à Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico da Aeronáutica, em 2005, para obtenção do título de Mestre em Ciência no Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica na Área de Infra-Estrutura de Transporte, com orientação do Prof. Dr. Wilson Cabral de Souza Junior.

Diante do apresentado, faz-se oportuno mostrar os seguintes pontos:

Pontos apresentados na tese de Marcelo Cicogna:

- Num caso inicial apresentado, chamado “estudo Xingu”, foram feitas simulações de um sistema contemplando a usina de Belo Monte e outras usinas inventariadas da região, como Altamira, Ipixuna, Kokraimoro, Jarina e Iriri. O período crítico deste sistema foi calculado como sendo de maio/1969 a fevereiro/1973, e o valor da energia firme de Belo Monte é apresentado como próximo ao valor encontrado nos estudos de viabilidade, cerca de 4.700 MWmédios;
- Foi argumentado que os aproveitamentos localizados na bacia amazônica têm por característica reservatórios com grandes volumes e áreas alagadas, e que seria simples antever os impactos ambientais que estariam em jogo;
- Foi argumentado, também, que a energia firme calculada de Belo Monte, cerca de 4.700 MWmédios, só seria possível de se obter quando todo o sistema Xingu fosse considerado, de maneira que Belo Monte se beneficiaria da regularização feita pelos grandes reservatórios de montante. A partir disso, foi feita uma simulação de Belo Monte isoladamente, obtendo-se uma energia firme para a usina de 1.172 MWmédios. Não foi informado o período crítico utilizado na simulação que levou a esse resultado.

Embasamento dos Estudos de Viabilidade:

- Inicialmente, cabe ressaltar que o AHE Belo Monte está previsto de ser integrado ao Sistema Interligado Nacional – SIN, o que implica em se utilizar nos estudos energéticos o período crítico do SIN, de jun/49 a nov/56, o que foi feito nos estudos de viabilidade;
- Desta maneira, a energia firme do AHE Belo Monte foi calculada pela simulação de todo o SIN, sendo contempladas as usinas em operação e futuras, numa visão de longo prazo, como preconizado nos critérios e estudos de dimensionamento de aproveitamentos hidrelétricos, considerando o ganho de energia firme do sistema, e não o ganho local ou apenas da bacia;
- Já antevendo os problemas que os reservatórios de grandes usinas acarretariam ao meio ambiente em uma região plana como a amazônica, os demais projetos previstos para o Xingu foram desconsiderados nos estudos energéticos, ou seja, apenas o AHE Belo Monte foi simulado nos estudos energéticos dos estudos de viabilidade;
- Além disso, os estudos não mostraram benefícios energéticos de se considerar reservatório de regularização para o AHE Belo Monte. Assim, o AHE Belo Monte foi definido como sendo a fio d'água nos estudos de viabilidade;
- Portanto, pelo fato do AHE Belo Monte estar isolado na configuração (sem usinas a montante e a jusante, embora simulada com todo o sistema), somado ao fato da usina ser a fio d'água, torna-se impossível, dentro dos conceitos preconizados, calcular um período crítico para o AHE Belo Monte.

8.0 - CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Os Estudos de Viabilidade do AHE Belo Monte foram elaborados dentro de conceitos e premissas bastante robustos, discutidos e aprofundados ao longo de muitos anos pelos técnicos do setor elétrico brasileiro, que levaram à elaboração dos manuais de referência do setor, os quais pode-se citar o “Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas” e as “Instruções para Estudos de Viabilidade de Aproveitamentos Hidrelétricos”.

Os pontos apresentados mostram as diferenças conceituais entre os estudos energéticos dos Estudos de Viabilidade do AHE Belo Monte e os estudos apresentados na tese do Marcelo Augusto Cicogna, que levaram às divergências nos valores de energia firme encontrados.

Portanto, o cálculo da energia firme do AHE Belo Monte, apresentado nos Estudos de Viabilidade, foi feito dentro das premissas e conceitos cultuados no setor elétrico brasileiro, não sendo possível sua comparação com os resultados obtidos em outros estudos que utilizam conceitos totalmente diferentes dos tradicionais. Tendo estes exercícios finalidade puramente acadêmica, sem preocupação alguma com as conseqüências que tais informações podem causar quando utilizadas por pessoas que não possuem o necessário conhecimento técnico em desenvolvimento de estudos para a implantação de novos aproveitamentos hidrelétricos.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. (2006) – “Plano Anual da Operação Energética – PEN 2006”;
- (2) ELETROBRÁS – Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro – SIPOT;
- (3) ELETROBRÁS/ELETRONORTE. (2002) – “COMPLEXO HIDRELÉTRICO BELO MONTE - ESTUDOS DE VIABILIDADE - RELATÓRIO FINAL – TEXTO - TOMO I”;
- (4) CICOGNA, M. A. (2003) – “Sistema de Suporte à Decisão para o Planejamento e a Programação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica” - Tese de doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas;
- (5) SEVÁ FILHO, A. O. (2005) - “TENOTÃ-MÕ - Alertas sobre as conseqüências dos projetos hidrelétricos no rio Xingu”;
- (6) LEITÃO, N. C. S. (2005) - “Avaliação Sócio-Econômica e Ambiental do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte” - Tese de mestrado - Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico da Aeronáutica;
- (7) MME/ELETROBRÁS/DNAEE. (1997) – “Instruções para Estudos de Viabilidade de Aproveitamentos Hidrelétricos”;
- (8) ALMEIDA R. S.; CARDINOT F. C.; CATHARINO M. G.; REZENDE P. F. V. S. E SAMPAIO L. L. (2005) – “Determinação do período crítico do sistema interligado nacional” - XVIII SNPTEE - Curitiba;
- (9) FORTUNATO, L. A. M.; ARARIPE NETO, T. A.; ALBUQUERQUE, J. C. R.; PEREIRA, M. V. F. (1990) – “Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica” – Eletrobás/EDUFF.