

MODELO DE RESERVATÓRIO EQUIVALENTE COM DESTAQUE UNITÁRIO

Afonso Henriques Moreira Santos;¹ Marco Aurélio Raphul Azevedo Garcia²; Felício Murbach Travareli³ & Leopoldo Uberto Ribeiro Junior⁴

RESUMO - - Este trabalho tem por objetivo analisar a confiabilidade energética quando os reservatórios são submetidos a mudanças de critérios operativos. A operação destes reservatórios está submetida a diversos interesses, muitas vezes conflitantes, como é o caso da geração de energia versus os usos locais. Desse modo deve-se mensurar o impacto de variações no volume útil dos principais reservatórios de forma a se adequar as alternativas que irão complementar a produção de energia, como é o caso da geração termelétrica nos períodos críticos, onde a oferta de energia por hidrelétricas não é capaz de suprir as demandas do mercado, sem que haja um grande impacto à população lindeira.

ABSTRACT - - This work has for objective to analyze the energy reliability when the reservoirs are submitted to changes of operative criteria. The operation of these reservoirs are submitted the to diverse interests, that in many times are conflicting, as it is the case of the energy generation versus the local uses. In this way it is necessary to measure the impact of variations in the useful volume of the main reservoirs that will adjusted the alternatives that will go to complement the energy production, as it is the case of the t Thermolectric Plants that in the critical periods, where it offers energy for hydro power plants is not possible to supply the market demands, without having a great impact for the population that live near the reservoir.

Palavras-chave: Reservatório, Energia, Bacia do Paraná.

¹ Professor da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, R. prof José Maria S. Campos 506 37500-200 Itajubá – MG. E-mail: afonso@unifei.edu.br

² Pesquisador do Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia - CERNE da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Minas Gerais - Brasil. Endereço: Rua Ricardo Pinto, 19/42, Santos – São Paulo, CEP 11035-171, Tel: (13) 32383210. Email: marco.rag@gmail.com

³ Pesquisador do Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia - CERNE da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Tel: (35) 36291401 Itajubá – MG. E-mail: travareli@yahoo.com.br

⁴ Pesquisador do Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia - CERNE da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Av. São Vicente de Paula 735, CEP 37502-082, Tel: (35) 36291401 Itajubá – MG. E-mail: leopoldo@unifei.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo a operação de reservatórios de usinas hidrelétricas não contempla apenas a geração de energia elétrica, mas levam em conta os diversos usos, como o saneamento, a irrigação, o controle de cheias, a recreação e até mesmo a beleza cênica. A incorporação destes usos leva à uma operação que dista do ótimo energético, porém, em contrapartida, atende os anseios da sociedade.

Esta influência da sociedade na operação dos reservatórios não é privilégio de países desenvolvidos. Historicamente o setor elétrico sempre prevaleceu sobre os usos da água, notadamente por ser ele o principal detentor de capital entre os vários usuários. Neste caminho desenvolvimentista (e porque não dizê-lo) positivista, o setor agrediu fortemente o meio ambiente, tendo sido, na realidade brasileira, um dos grandes motivadores para o fortalecimento da ética ambiental, no sentido de contrapor. A força de tal ética é tamanha que chega, hoje, mesmo, a sufocar o desenvolvimento equilibrado.

Mas a questão ambiental não se restringe aos impactos de novas intervenções de novas centrais. O racionamento, como já foi dito, pois à mostra as chagas ambientais da operação, entendendo-se “ambientais” no seu sentido *lato* onde o homem é um dos principais atingidos, e não apenas a biota. Esta nova ética é reforçada a partir de princípios consolidados na Constituição Federal de 1988, mas, a falta de regulamentação complementar, e de uma cultura apropriada, permitem o movimento autocrático do setor elétrico continue no seu movimento inercial, sufocando os demais interesses.

De outro lado, observa-se que o Ministério Público e o próprio Judiciário incorporam, dia-a-dia, esta nova ética, e com a força constitucional que lhes é nata, começam a mudar tais práticas. Tudo leva a crer que não mais será possível ao setor elétrico operar livremente os reservatórios. Historicamente os reservatórios foram desenvolvidos para regularizar vazões, donde se origina conceitos como o da energia firme. Com a entrada de gerações térmicas o reservatório passa a ser visto como um grande gestor de estoque, na busca de reduzir o custo total de produção de energia, evitando o uso da geração térmica mais cara ou, até, de déficits energéticos. Tanto no primeiro caso como no segundo o volume útil dos reservatórios era largamente utilizado, e a perda de produtividade das centrais, consequência de seus rebaixamentos, não eram prioritariamente considerados. Mais uma vez o racionamento ensinou, e a perda de produtividade reduziu enormemente a capacidade operativa elétrica do sistema. Já se disse, também, que o livre esvaziamento expõe o setor a grandes riscos, donde motivou a criação das curvas de aversão a risco. Combinando esses dois conceitos, e levando-se em consideração a já importante capacidade de geração térmica do país, e que essa geração térmica não se adequa muito bem aos modelos de custos marginais crescentes, principalmente pela existência dos conceitos de take-or-pay dos

contratos de gás, chega-se ao novo momento do setor elétrico brasileiro onde o melhor parece ser maximizar a geração hidrelétrica, buscando deixar os reservatórios o mais cheio possível, ganhando-se produtividade e reduzindo-se riscos.

O objetivo deste trabalho, que foi desenvolvido pela equipe do Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia – CERNE (2006), da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e apresentado á Petrobrás é apresentar uma metodologia que permita a contraposição dos efeitos da redução do volume útil de reservatórios de regularização, de modo a se observar o efeito local e global em um único modelo. Para isto o modelo será aplicado à Bacia do paraná, principal conjunto de obras de geração de energia do país. Desse modo, toda modelagem é desenvolvida focando uma bacia hidrográfica, ao invés de sub-mercados elétricos, tendo em vista o uso da água segundo diferentes interesses.

2 MODELO AGREGADO

Inicialmente será apresentado o modelo genérico, figura 1, onde serão utilizados, essencialmente dois tipos de otimização com objetivos distintos. No primeiro caso, será objetivada a maximização da carga a fim de se determinar a maior carga crítica que pode ser atendida pelo sistema de forma ininterrupta. Em seguida, será reduzido o volume útil de um dos reservatórios e será determinada a operação de uma termelétrica complementar para que a carga crítica continue a ser atendida. O modelo trabalha com os reservatórios da bacia de forma agregada. A utilização de tais modelos se justifica pelo fato de que este é um trabalho que visa o planejamento e não a operação detalhada.

O sistema de otimização proposto terá reduzido o volume útil de um dos reservatórios e será determinada a operação de uma termelétrica complementar para que a carga crítica continue a ser atendida. Tal geração deve ser de origem termelétrica dada sua flexibilidade para complementar a redução de capacidade do reservatório equivalente.

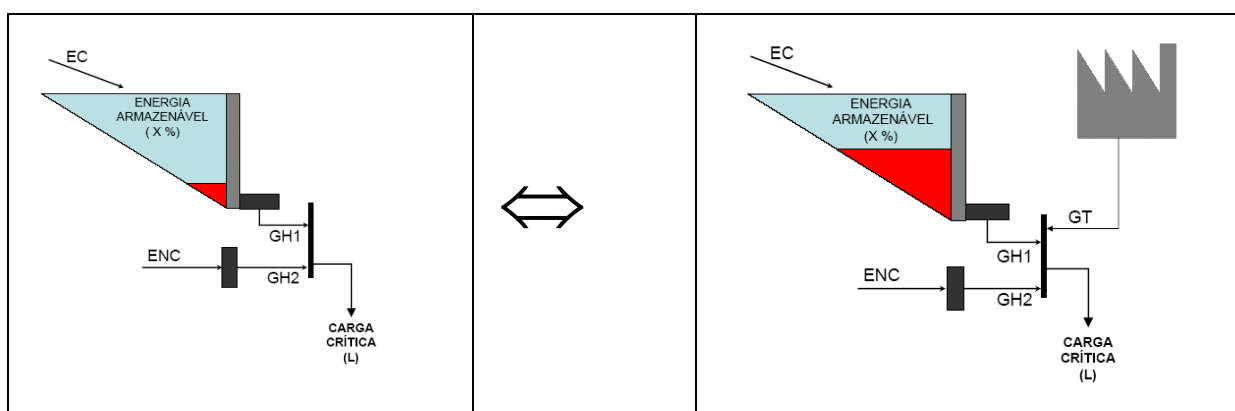


Figura 1 - Modelo de equivalência do sistema hidrelétrico com 100% do Volume Útil e o modelo hidrotérmico com o reservatório equivalente com X% de seu Volume Útil

Para o cálculo da Energia Firme tem-se a seguinte função objetivo para o modelo programação linear:

$$\begin{aligned}
F.O. &\rightarrow z = MAX L \\
S.T. & \\
EA_t &= EA_{t-1} - U_t - GH_t + EC_t \\
G_t + ENC_t &= L \\
0 \leq EA_t &\leq EnergiaArmazenávelTotal \\
G_{min} \leq G_t &\leq G_{max} \\
0 \leq U_t &
\end{aligned} \tag{1}$$

Onde:

- EA_t - Energia Armazenável no reservatório no instante t
EA_{t-1} - Energia Armazenável no reservatório no instante t-1
L - Carga crítica a ser atendida pelo sistema

Para o cálculo da termelétrica complementar, tem-se de atender às mesmas restrições, porém a carga crítica já é conhecida e a função objetivo deixa de ser de maximização da carga crítica e passa a ser de minimização da geração termelétrica. Assim, tem-se:

Para o cálculo da Energia Firme tem-se a seguinte função objetivo para o modelo programação linear:

$$\begin{aligned}
F.O. &\rightarrow z = MIN \sum_{t=i}^T GT_t \\
S.T. & \\
EA_t &= EA_{t-1} - U_t - GH_t + EC_t \\
G_t + ENC_t + GT_t &= L \\
0 \leq EA_t &\leq EnergiaArmazenávelTotal \\
G_{min} \leq G_t &\leq G_{max} \\
0 \leq U_t &
\end{aligned} \tag{2}$$

Onde:

- EA_t - Energia Armazenável no reservatório no instante t
EA_{t-1} - Energia Armazenável no reservatório no instante t-1
L - Carga crítica a ser atendida pelo sistema

3 MODELO DE RESERVATÓRIO EQUIVALENTE COM DESTAQUE UNITÁRIO

Através deste modelo, buscou-se a separação do efeito da redução do volume útil em um único reservatório, visando avaliar o impacto da redução do volume útil (VU) na confiabilidade energética (energia firme) e avaliar o impacto da redução de VU na geração hidrelétrica (energia gerada), ao longo de todas as usinas da bacia do Paraná.

O objetivo final é permitir que se faça uma análise sistêmica (análise global), observando o comportamento local (reservatório destacado).

Inicialmente, adotou-se um caso base constituído de nove usinas hidrelétricas, sendo cinco usinas com reservatório de regularização e quatro usinas fio d'água, conforme a Figura 2. Uma das usinas será objeto de estudo de efeito de variação de VU e aqui denominada usina '0'. Será obtido então três sistemas equivalentes. O sistema equivalente EQ0 será composto apenas pela central em estudo. O sistema EQ1 consistirá na agregação das centrais a montante da central '0' (montante do ponto de fronteira A) e o sistema EQ2 será composto pelas centrais a jusante da mesma (jusante do ponto de fronteira B).

O diferencial desta modelagem com relação à uma única agregação é que esta irá permitir a desagregação do efeito da variação do volume útil de um reservatório em estudo para todos os reservatórios da cascata, de modo a se obter uma espacialização do efeito local.

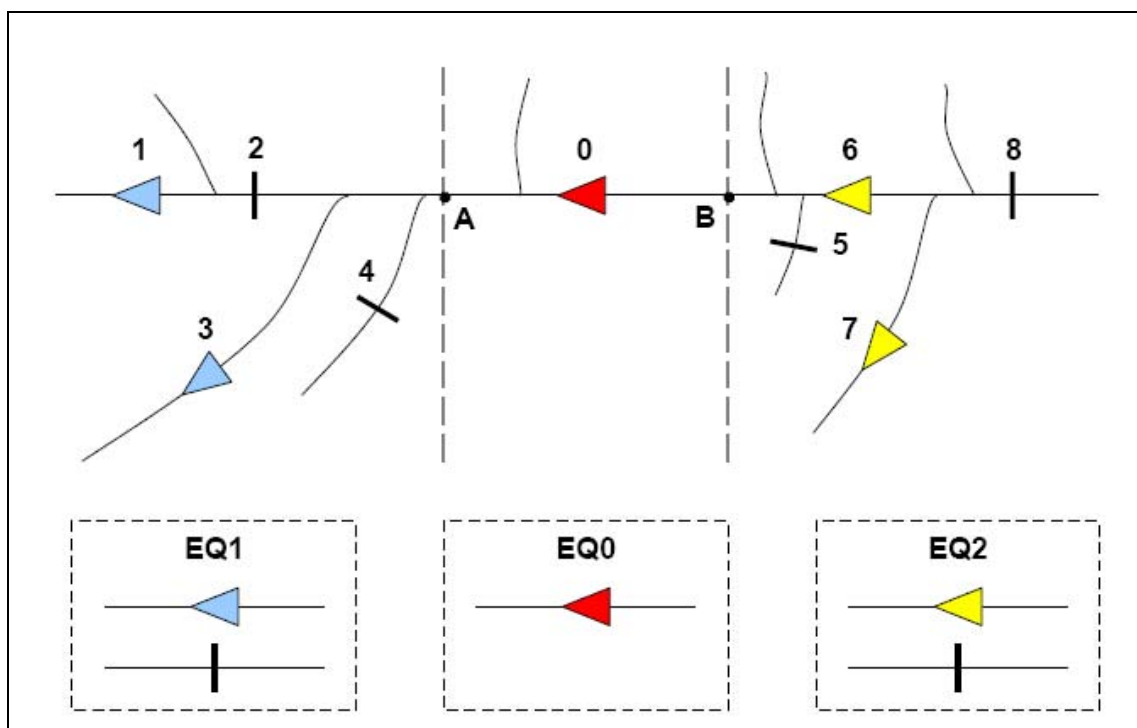


Figura 2 - Modelo para avaliação do efeito da variação de VU em um único reservatório

3.1 Cálculo do Reservatório Equivalente 1 (E1)

Para o cálculo de cada reservatório equivalente será utilizada a modelagem apresentada na Figura 1, de modo que o sistema energético equivalente consistirá em uma “usina” de energia armazenável EA e energia afluyente controlável EC, e uma usina a fio-d’água de energia afluyente não-controlável ENC.

Como objetiva-se conhecer o efeito em toda a cascata, tem-se que as UHE’s a jusante do ponto de fronteira A, na cascata direta, são representados apenas por suas produtividades (p), sem as respectivas vazões incrementais, resultando em um modelo equivalente conforme apresentado na Figura 3.

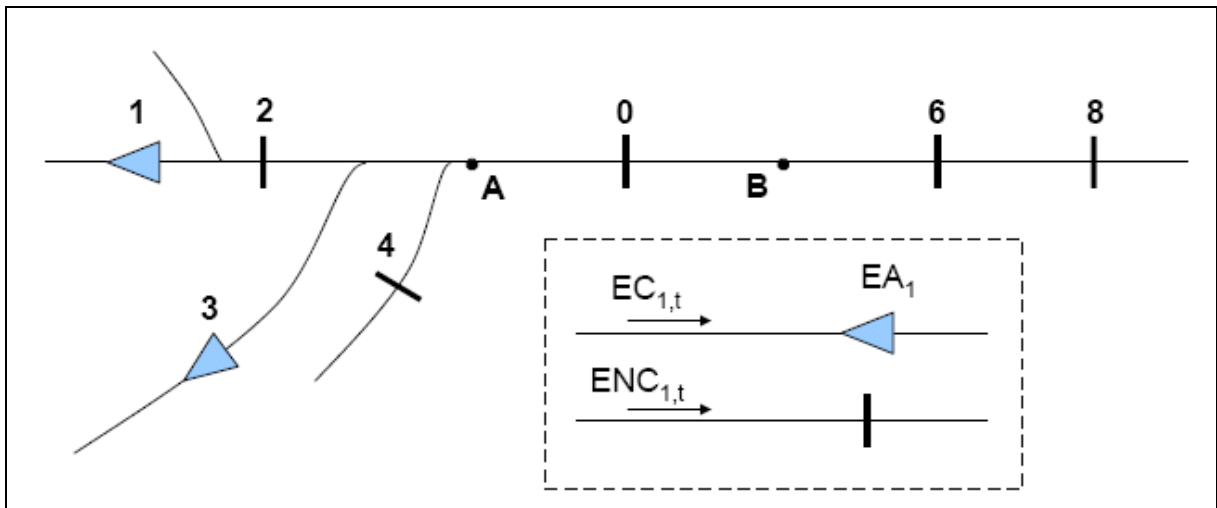


Figura 3 - Sistema Equivalente EQ1

3.2 Cálculo do Reservatório Equivalente 0 (E0)

Analogamente, tem-se a representação da cascata direta da central '0'. Como anteriormente, as UHE's diretamente representadas na cascata, à jusante do ponto B, são representadas apenas por suas produtividades, conforme a Figura 4.

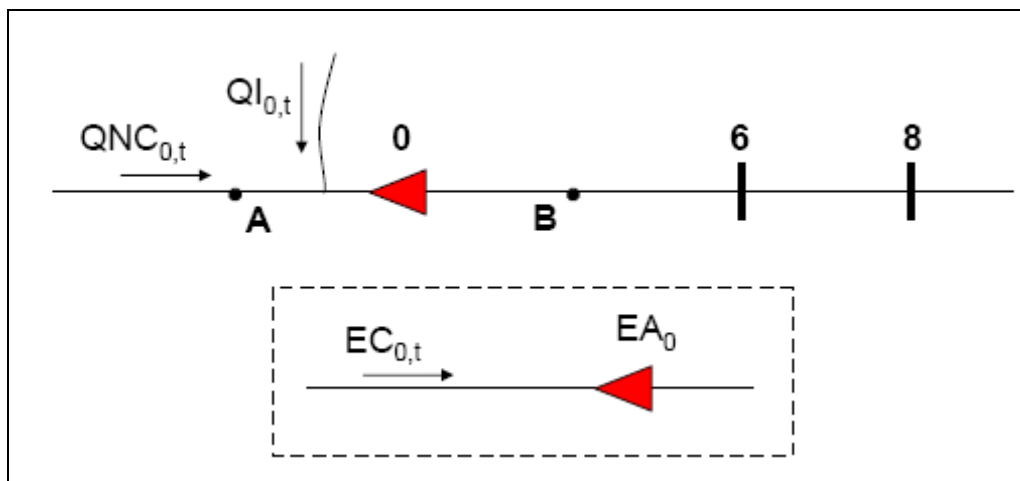


Figura 4 - Sistema Equivalente EQ0

Vale destacar que o sistema EQ0 é totalmente desacoplado do sistema EQ1, sendo que a vazão que aflui ao sistema EQ0 é a soma de sua vazão incremental (QI0) com a parcela de vazão que aflui do sistema de montante sem nunca ter passado por um reservatório. No caso base é:

$$Q_{NC_0} = Q_{I_2} + Q_{I_4} \quad (3)$$

Onde Q_{NC0} significa vazão não controlável ao reservatório. Daí resulta o sistema equivalente EQ0.

3.3 Cálculo do Reservatório Equivalente 2 (E2)

O equivalente do sistema de jusante é calculado isolando-o totalmente do sistema de montante, no ponto B. Para tanto, considera-se, não existir vazão passando por este ponto. Daí

calcula-se de maneira tradicional o sistema equivalente. Como resultado, tem-se o sistema apresentado através da Figura 5.

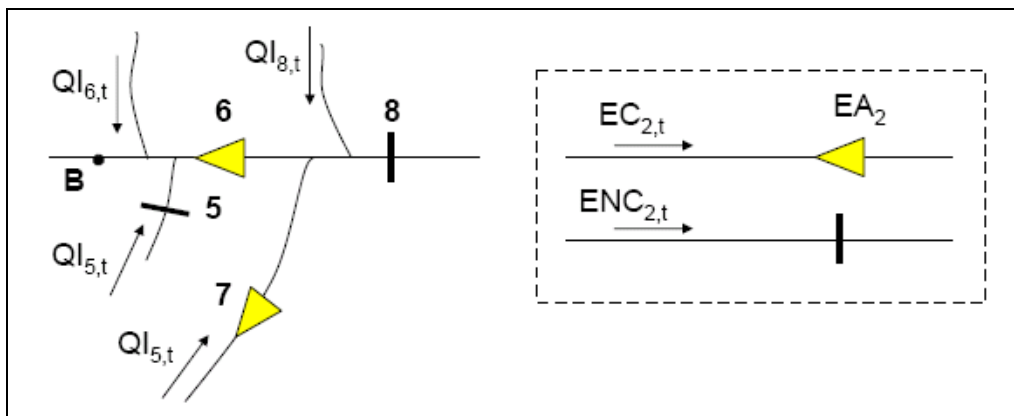


Figura 5 - Sistema Equivalente EQ2

O fluxograma utilizado para implementação do simulador no MatLab pode ser observado através da Figura 6.

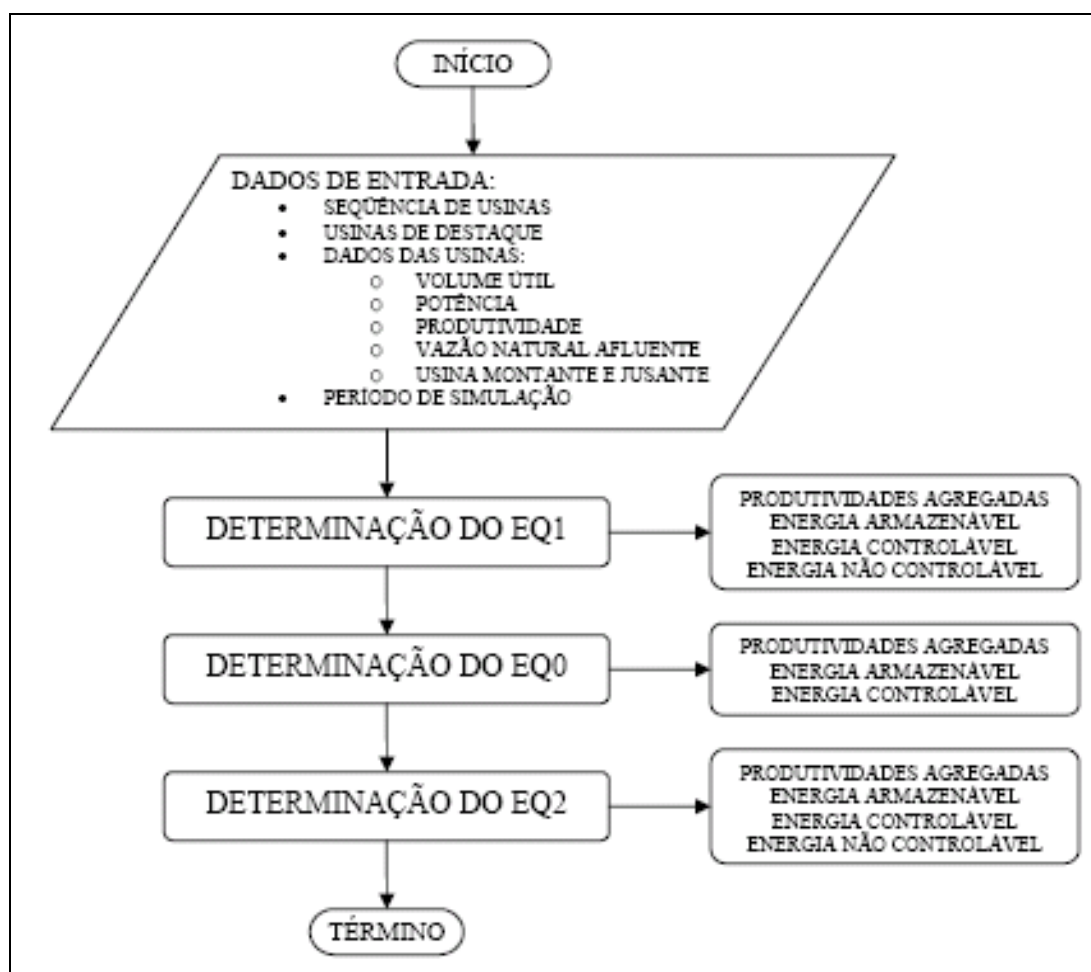


Figura 6 - Fluxograma para Implementação do Modelo de Reservatório Equivalente com Destaque Unitário

4 APLICAÇÃO DOS MODELOS À BACIA DO PARANÁ

O modelo apresentado anteriormente será aplicado à bacia do Paraná. Segundo informações obtidas no site do ONS (2006), a Bacia conta com 52 usinas, sendo 26 com reservatório de regularização e 26 fio-d'água. A potência instalada das usinas localizadas na Bacia corresponde a 49.365 MW, abastecendo às regiões de maior população, consumo e produção industrial do país. O diagrama esquemático pode ser observado através da Figura 7

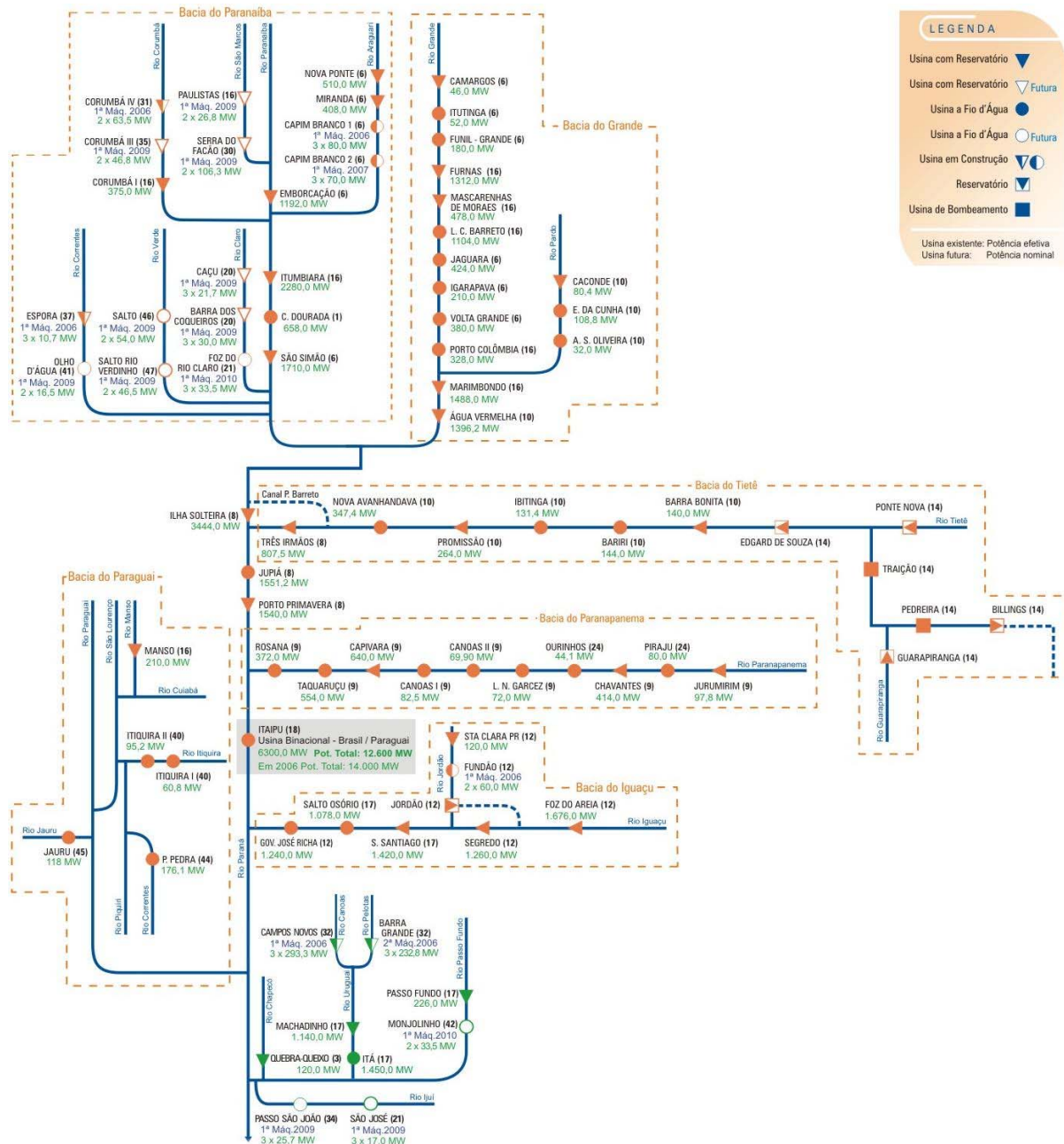


Figura 7 – Diagrama de Usinas da Bacia do Paraná

5 RESERVATÓRIO EQUIVALENTE DA BACIA COM DESTAQUE UNITÁRIO

A modelagem tradicional de reservatório equivalente não permite que se destaque a operação da usina hidrelétrica que se deseja efetuar a análise. Para isto, foi desenvolvida o modelo de

reservatório equivalente com destaque unitário. Aplicando-se esta metodologia à bacia em estudo e considerando-se a variação de volume útil em Furnas, obteremos os sistema de reservatórios equivalentes EQ1 (figura 8), EQ0 (figura 9) e EQ2. Aqui não representaremos EQ2 devido ao mesmo compreender todas as usinas à jusante de Furnas.

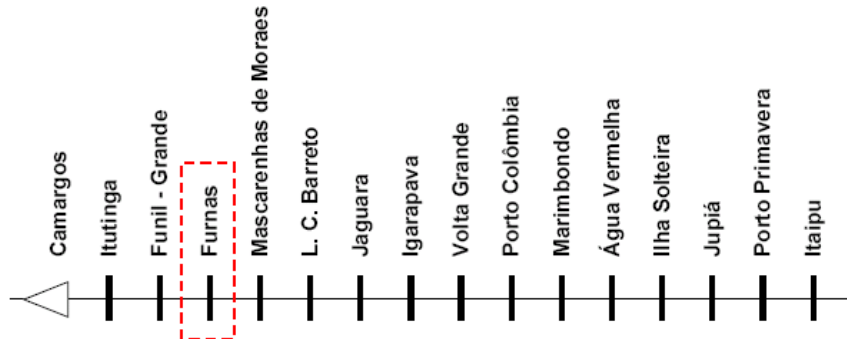


Figura 8 - Sistema Equivalente EQ1

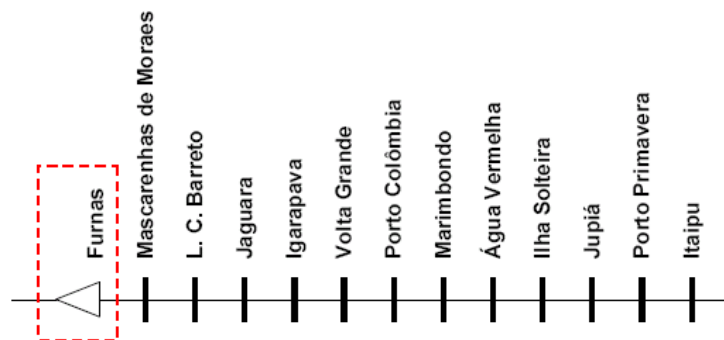


Figura 9 - Sistema Equivalente EQ0

As Figura 8 e Figura 9 apresentam a operação de cada um dos reservatórios equivalentes. A geração de energia é apresentada nas figuras 10 e 11 para o reservatório de Furnas com 100% e 50% de seu volume útil, respectivamente. A energia armazenada é apresentada nas figuras 12 e 13.

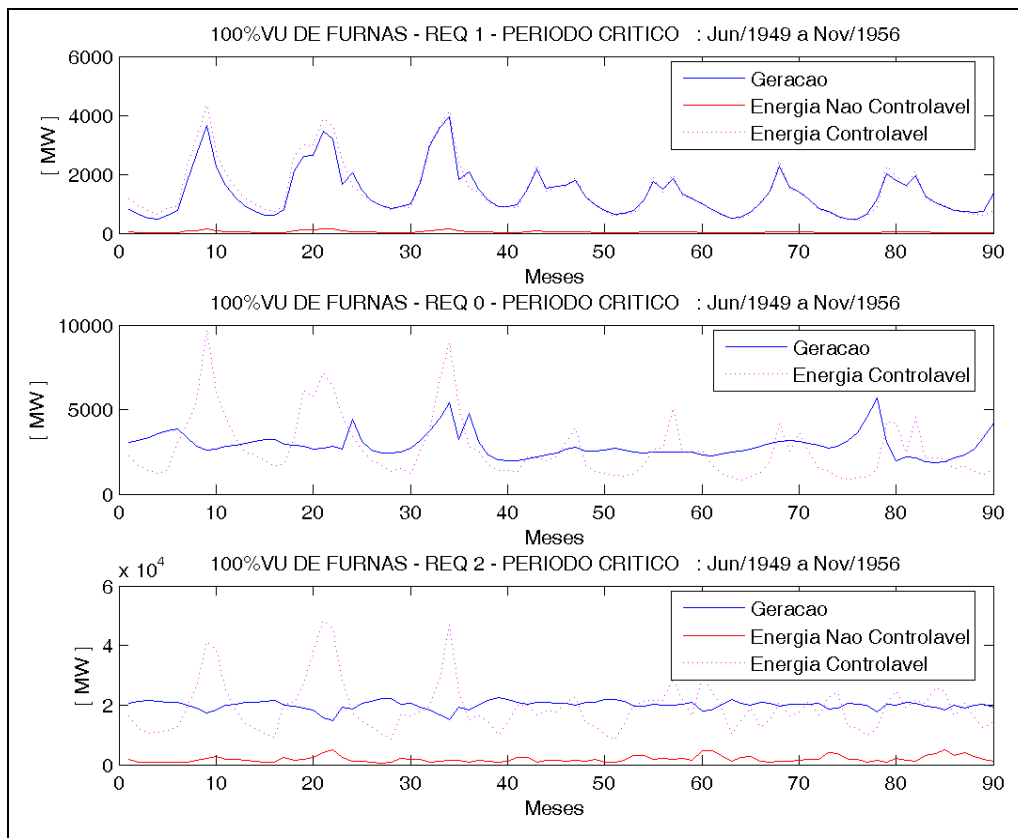


Figura 10 - Geração do Sistema Equivalente da Bacia do Paraná (UHE Furnas com 100% do Volume Útil)

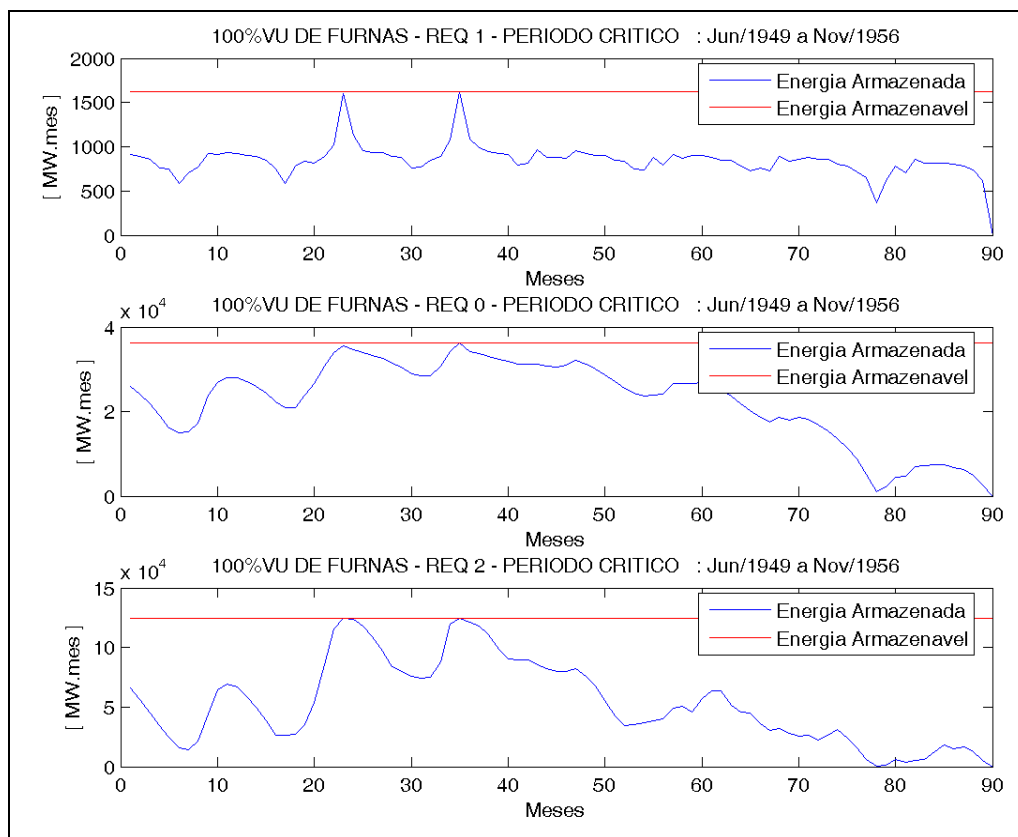


Figura 11 Energia Armazenada do Sistema Equivalente da Bacia do Paraná (UHE Furnas com 100% do Volume Útil)

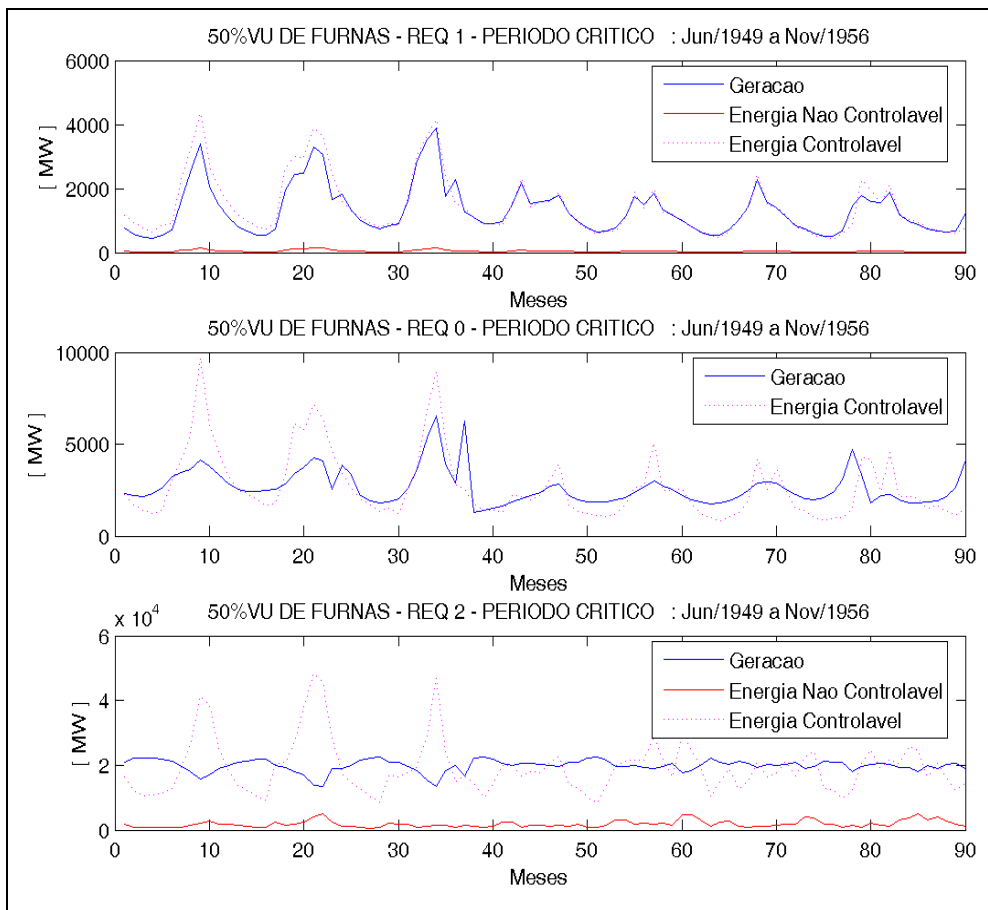


Figura 12 - Geração do Sistema Equivalente da Bacia do Paraná (UHE Furnas com 50% do Volume Útil)

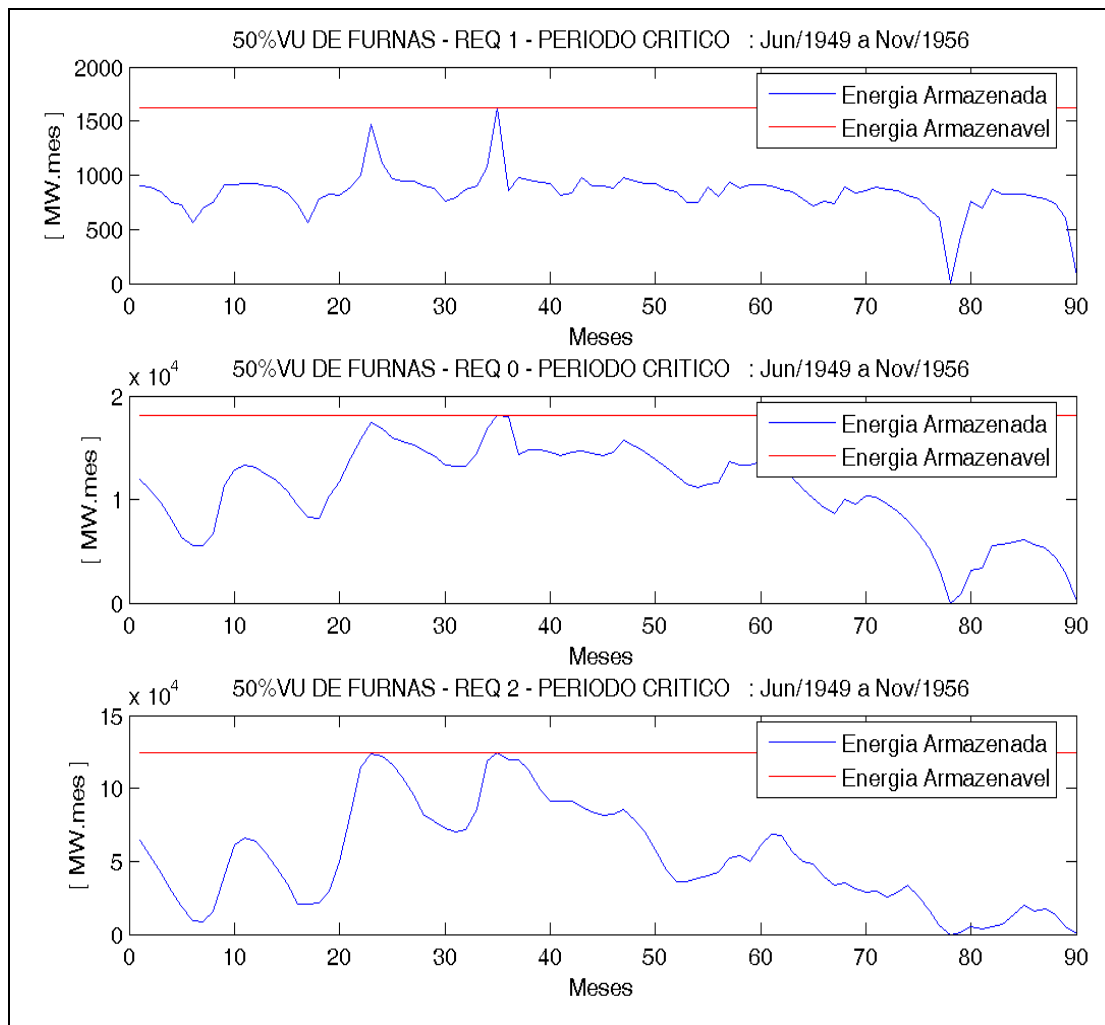


Figura 13 - Energia Armazenada do Sistema Equivalente da Bacia do Paraná (UHE Furnas com 100% do Volume Útil)

Para este caso a perda de energia firme é de 378.88 MW, equivalente a potência instalada necessária à termelétrica que deverá operar de modo complementar para que a carga crítica do sistema continue a ser atendida. A tabela 1 apresenta uma análise de sensibilidade da variação do volume útil dos cinco principais reservatórios de regularização da bacia: Furnas, Emborcação, Ilha Solteira, Itumbiara e Nova Ponte. A figura 14 apresenta a variação da energia firme da bacia em função da variação do volume útil nestas usinas.

Tabela 1 - Análise de sensibilidade da variação do volume útil de 5 reservatórios

RESERVATÓRIO EM DESTAQUE	%VU	EF	ΔEF	POTÊNCIA DA TERMELETRICA	FCAP HISTÓRICO	FCAP PER. CRÍTICO
FURNAS	0	25,275.14	800.11	800.11	0.07	0.50
FURNAS	10	25,359.39	715.86	715.86	0.07	0.51
FURNAS	20	25,443.63	631.62	631.62	0.06	0.51
FURNAS	30	25,527.88	547.37	547.37	0.06	0.51
FURNAS	40	25,612.13	463.12	463.12	0.06	0.52
FURNAS	50	25,696.37	378.88	378.88	0.06	0.53
FURNAS	60	25,780.62	294.63	294.63	0.06	0.55
FURNAS	70	25,864.87	210.38	210.38	0.06	0.57
FURNAS	80	25,943.52	131.73	131.73	0.06	0.61
FURNAS	90	26,009.38	65.87	65.87	0.06	0.61
EMBORCAÇÃO	0	25,590.15	485.10	485.10	0.05	0.52
EMBORCAÇÃO	10	25,642.89	432.36	432.36	0.06	0.52
EMBORCAÇÃO	20	25,695.64	379.61	379.61	0.06	0.53
EMBORCAÇÃO	30	25,748.39	326.86	326.86	0.06	0.54
EMBORCAÇÃO	40	25,801.13	274.12	274.12	0.06	0.55
EMBORCAÇÃO	50	25,853.88	221.37	221.37	0.06	0.57
EMBORCAÇÃO	60	25,906.62	168.63	168.63	0.06	0.60
EMBORCAÇÃO	70	25,951.54	123.71	123.71	0.06	0.61
EMBORCAÇÃO	80	25,992.77	82.48	82.48	0.06	0.61
EMBORCAÇÃO	90	26,034.01	41.24	41.24	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	0	25,909.04	166.21	166.21	0.06	0.60
ILHA SOLTEIRA	10	25,928.50	146.75	146.75	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	20	25,944.80	130.45	130.45	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	30	25,961.11	114.14	114.14	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	40	25,977.42	97.84	97.84	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	50	25,993.72	81.53	81.53	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	60	26,010.03	65.22	65.22	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	70	26,026.33	48.92	48.92	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	80	26,042.64	32.61	32.61	0.06	0.61
ILHA SOLTEIRA	90	26,058.94	16.31	16.31	0.06	0.61
ITUMBIARA	0	25,737.68	337.57	337.57	0.06	0.54
ITUMBIARA	10	25,775.68	299.57	299.57	0.06	0.55
ITUMBIARA	20	25,813.67	261.58	261.58	0.06	0.56
ITUMBIARA	30	25,851.66	223.59	223.59	0.06	0.57
ITUMBIARA	40	25,889.65	185.60	185.60	0.06	0.59
ITUMBIARA	50	25,926.73	148.52	148.52	0.06	0.61
ITUMBIARA	60	25,956.44	118.81	118.81	0.06	0.61
ITUMBIARA	70	25,986.14	89.11	89.11	0.06	0.61
ITUMBIARA	80	26,015.84	59.41	59.41	0.06	0.61
ITUMBIARA	90	26,045.55	29.70	29.70	0.06	0.61
NOVA PONTE	0	25,650.39	424.86	424.86	0.06	0.53
NOVA PONTE	10	25,697.11	378.14	378.14	0.06	0.53
NOVA PONTE	20	25,743.83	331.42	331.42	0.06	0.54
NOVA PONTE	30	25,790.55	284.70	284.70	0.06	0.55
NOVA PONTE	40	25,837.28	237.97	237.97	0.06	0.56
NOVA PONTE	50	25,884.00	191.25	191.25	0.06	0.58
NOVA PONTE	60	25,929.14	146.11	146.11	0.06	0.61
NOVA PONTE	70	25,965.67	109.58	109.58	0.06	0.61
NOVA PONTE	80	26,002.19	73.06	73.06	0.06	0.61
NOVA PONTE	90	26,038.72	36.53	36.53	0.06	0.61

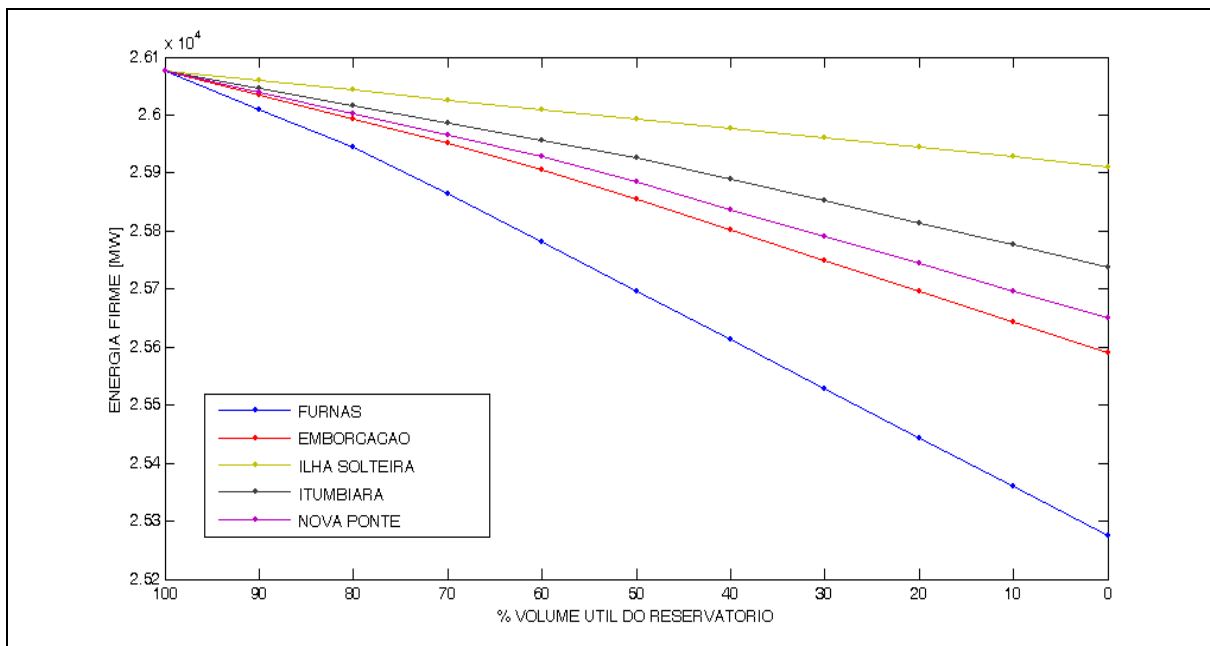


Figura 14 - Variação da energia firme da bacia do Paraná em função da variação do volume útil de 5 usinas

6 CONCLUSÃO

A metodologia aqui apresentada buscou confrontar o impacto local e global da variação do volume útil em um dos reservatórios de regularização da bacia do Paraná.

Como principal resultado observa-se que a perda de energia firme não é crítica, podendo ser suprida pelo adequado uso do parque termelétrico atual ou pela instalação de gerações distribuídas próximas às cargas, já que o fator de capacidade de tais termelétricas seria baixo, operando significativamente apenas no período crítico.

Faz-se necessário comentar o que vem acontecendo em algumas regiões hidro geradoras: a população lindeira ao lago de Furnas vem pressionando o Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH para que a cota mínima operativa passe de 750 para 762, reduzindo o volume útil a praticamente metade, sendo que há indícios claros que tal pleito será acolhido; a central hidrelétrica de Caconde teve seus critérios operativos modificados, reduzindo a liberdade de esvaziamento, para atender os interesses turísticos do seu entorno; a operação das centrais do Araguaia estão restritas por uma vazão máxima a jusante, no período de seca, de maneira a se preservar as praias, que são importantes pontos turísticos no centro-oeste; a central hidrelétrica de Paulo Afonso deverá proximamente verter água em períodos definidos para se revitalizar a cachoeira de mesmo nome, com fins turísticos. Todas essas mudanças levam a crer que o setor elétrico precisa se proteger de forma diferente do que vem fazendo, com relação às variações hidrológicas e de carga.

Existem três formas de um sistema hidrelétrico se proteger dos riscos hidrológico e de carga: o primeiro é o armazenamento de água; o segundo é a complementariedade térmica; o terceiro é o

aumento da elasticidade da demanda, com forte sinal de preço na geração. Historicamente, a reservação foi a maneira de se proteger das incertezas.

Com a inserção significativa de capacidade geradora térmica, os critérios operativos do setor eletro-energético deverão sofrer profundas mudanças. Observando outros países, onde a geração térmica é significativa, observa-se que a geração hidrelétrica é a fio d'água, tendo a água a função precípua de reduzir o consumo de combustível. Trazendo este conceito para a nova realidade que se inicia no país, observa-se que uma significativa capacidade térmica traria enorme vantagem. Do ponto de vista de confiabilidade de suprimento, a capacidade térmica substituiria a necessidade de enormes reservatórios. Por outro lado a afluência hídrica levaria a uma baixa operação destas centrais termelétricas, não implicando em grandes consumos de gás. O modelo ideal para isto seria o de um suprimento flexível de gás natural, ou a existência de um mercado secundário de gás natural, ou ainda a possibilidade de estocá-lo. Este último ponto começa a ter significado em termos mundiais, sendo que a combinação de áreas de estoque (cavernas, por exemplo) e capacidade geradora poderia dar uma enorme flexibilidade ao setor. O mercado secundário dependeria do maior amadurecimento do uso do gás no país, notadamente com sistemas bi-energéticos. A flexibilidade dos contratos dependeria, dentre outros fatores, da forma de remuneração dos investimentos na infra-estrutura gasífera, tornando a commodity gás natural com característica mais flexível.

7 AGRADECIMENTOS

A equipe do Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia – CERNE da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, agradece o subsídio da Petrobrás para o desenvolvimento deste trabalho.

8 BIBLIOGRAFIA

CERNE - Centro de Excelência em Recursos Naturais e Energia, (2006) – “Projeto de Elaboração de Estudos de Revisão de Critérios Operativos dos Reservatórios do Sistema Interligado Nacional Buscando Oportunidades para a Geração Termelétrica” - 3º relatório do contrato de consultoria – FUPAI – PETROBRAS.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico - Sistema Interligado Nacional
<<http://www.ons.org.br> Acessado em 18.04.2006