

Otimização da Operação Energética das Usinas do Rio Paranapanema

S. Soares; A. Carneiro; M. Cicogna; D. Silva F^o; J. Chaves

Resumo – Este trabalho apresenta um estudo de otimização da operação energética das usinas do Rio Paranapanema. Os resultados foram obtidos através do emprego de um modelo de otimização determinístico especialmente desenvolvido para a operação energética de sistemas hidrotérmicos de potência. Os estudos consideram as oito usinas hidrelétricas do sistema concessionado à Duke Energy International, Geração Paranapanema S.A. O horizonte de estudo é bastante amplo, considerando todo o histórico de vazões naturais entre os anos de 1931 a 2000. Por fim, regras de operação para a cascata do Rio Paranapanema foram levantadas, utilizando-se os resultados dos estudos de otimização, e a energia firme do sistema foi calculada e comparada com a energia firme da regra tradicional, indicando um ganho da ordem de 1%.

Palavras-chave — Otimização, planejamento energético, regras de operação, energia firme.

I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta um estudo de otimização da operação energética das usinas do Rio Paranapanema. Os resultados foram obtidos através do emprego de um modelo de otimização determinístico aplicado na obtenção da decisão ótima de operação das oito usinas, sobre o histórico de vazões naturais registradas entre os anos de 1931 a 2000. Regras de operação dos reservatórios foram então obtidas resultando num aumento de energia firme do sistema quando comparadas as regras tradicionais de operação em paralelo.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema hidrelétrico do rio Paranapanema, localizado na bacia do rio Paraná, é composta por oito usinas hidrelétricas, com potência instalada total de 2308 MW. Três destas usinas possuem reservatório de acumulação e cinco são a fio d'água, conforme ilustrado na Figura 1.

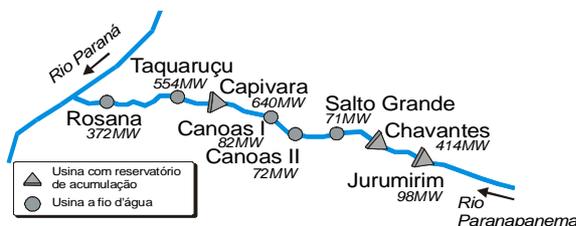


Figura 1 – Usinas do rio Paranapanema.

S. Soares é professor da Faculdade de Eng. Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. **M. Cicogna** é aluno de doutorado da Faculdade de Eng. Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas. **A. Carneiro** é professor do Depto. de Eng. Elétrica da Escola de Eng. de São Carlos / USP. **D. Silva F^o** é aluno de doutorado do Depto. de Eng. Elétrica da Escola de Eng. de São Carlos / USP. **J. Chaves** é gerente geral de assuntos regulatórios da Duke Energy International, Geração Paranapanema S.A.

Uma das características marcantes deste sistema é que as primeiras cinco usinas a montante apresentam regime hidrológico com características da região sudeste, enquanto as três usinas de jusante apresentam ciclo hidrológico com características do sistema sul. Além disso, há uma grande vazão incremental entre as usinas de Canoas I e Capivara, fazendo com que a última, apesar de ser uma usina de jusante, também trabalhe na regularização das vazões afluentes.

III. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A operação ótima do sistema é obtida por meio de um modelo de otimização determinístico que utiliza fluxo em rede não linear com arcos capacitados [4]. Sendo um otimizador determinístico que pressupõe conhecidas as vazões, o modelo de otimização obtém uma solução de operação das usinas hidrelétricas que minimiza o custo da complementação termelétrica.

IV. ANÁLISE DA SOLUÇÃO ÓTIMA

As trajetórias ótimas de volume útil das usinas do rio Paranapanema para um ano de vazões afluentes iguais a 80% das médias mensais de longo termo (MLT) são apresentadas na Figura 2.

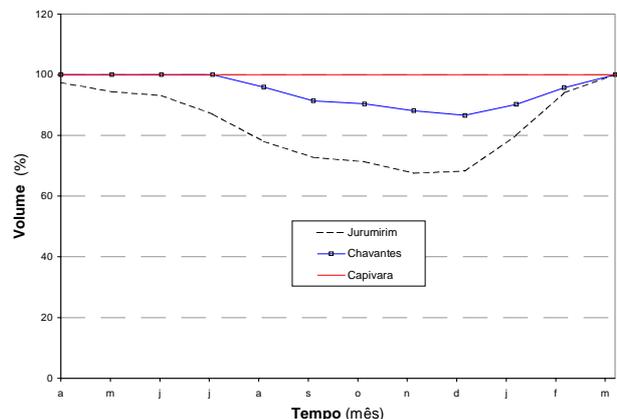


Figura 2 – Trajetórias ótimas de volume para 80% da MLT.

Observa-se que o padrão de comportamento é quase clássico, onde a usina mais a montante, Jurumirim, oscila seu volume com maior intensidade, com o intuito de regularizar a vazão do rio. Em contrapartida, a usina mais a jusante, Capivara, trabalha sempre com volume máximo, com alta produtividade, já que as vazões que chegam até ela são as maiores dentre as usinas com reservatório de acumulação. A usina de Chavantes apresenta um comportamento intermediário entre as outras duas usinas, oscilando o volume de seu reservatório para ajudar na regularização, mas também tentando manter-se com produtividade elevada [5].

Esta é a tendência do comportamento ótimo das usinas na cascata. As usinas de montante responsabilizam-se pela regularização da vazão afluyente permitindo que as usinas de jusante mantenham-se cheias, com produtividade elevada.

As oscilações de volume das usinas podem ser maiores ou menores, dependendo fundamentalmente das vazões afluentes a serem regularizadas. Na Figura 3, mostra-se a solução encontrada para um período de dez anos do histórico de vazões naturais afluentes. Neste gráfico são mostradas as trajetórias de volumes das usinas e suas respectivas vazões afluentes.

Analisando os resultados, nota-se que a operação ótima apresenta uma variabilidade muito grande, oriunda da própria variação das vazões afluentes. Por se tratar de um programa determinístico, com perfeito conhecimento das vazões futuras, a otimização encarrega-se de acomodar as trajetórias de volume. De forma geral, são identificados quatro padrões típicos de comportamento.

O primeiro deles é o padrão clássico, bem comportado, semelhante ao caso verificado na otimização para as médias mensais, onde a usina de Capivara mantém-se cheia, Chavantes depleciona um pouco e Jurumirim oscila mais, regularizando as vazões naturais. Este padrão pode ser observado, por exemplo, entre os meses de março de 1933 a abril de

1934.

O segundo padrão é semelhante ao anterior, porém agora todas as usinas deplecionam, inclusive Capivara, que neste caso não consegue receber vazões suficientemente regularizadas. Este comportamento, conforme pode ser observado entre os anos de 1932 e 1933, está associado a vazões afluentes maiores, inclusive com incremental mais alta em Capivara.

O terceiro padrão de comportamento é aquela onde a usina de Capivara depleciona percentualmente mais do que as outras usinas, subvertendo a ordem de deplecionamento de montante para jusante, observada anteriormente. Este comportamento, conforme pode ser observado entre os anos de 1937 a 1938, deve-se às grandes vazões afluentes incrementais de Capivara, fazendo com que esta usina assuma características de usina de montante, deplecionando para evitar vertimentos, o que nem sempre é possível.

Finalmente, o quarto padrão é aquele em que as usinas permanecem cheias, praticamente sem deplecionar. Este comportamento, observado por exemplo entre os anos de 1934 e 1935, ocorre devido a vazões afluentes bastante baixas. Esta situação é mais rara e nela manifesta-se o caráter conservativo do sistema, preservando a produtividade das usinas em função das baixas vazões afluentes.

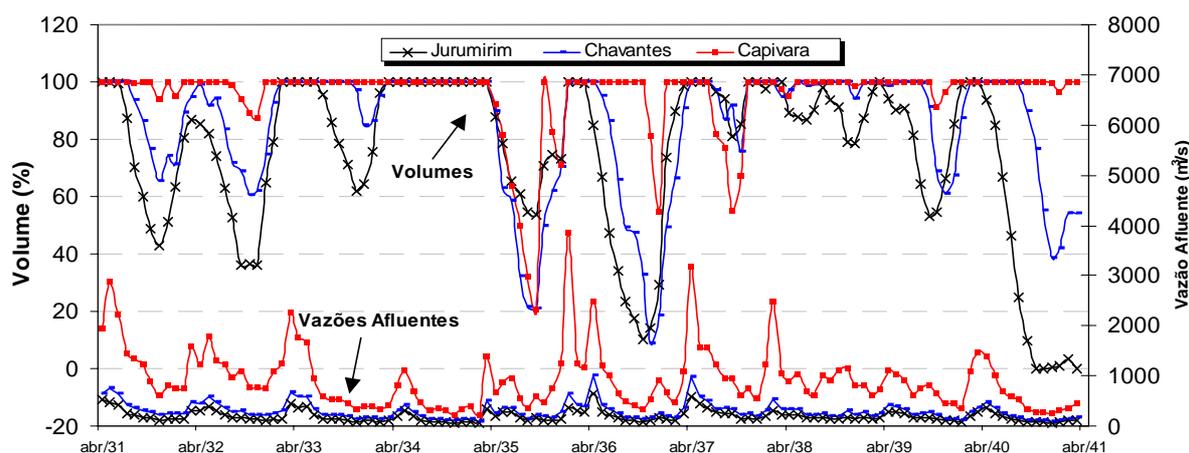


Figura 3 – Trajetórias de Volume para um período do Histórico.

Na realidade, os quatro padrões identificados e justificados aparecem muitas vezes misturados, já que suas identificações não são rígidas, sofrendo influência das vazões anteriores e posteriores aos períodos de estudo. Todavia, estes quatro casos, isolados ou combinados, abrangem grande parte das decisões ótimas de operação e indicam uma lógica de funcionamento da cascata. Este fato justifica o estudo da operação ótima na obtenção de regras de operação.

V. REGRAS DE OPERAÇÃO

As regras de enchimento/esvaziamento dos reservatórios, ou simplesmente regras de operação, definem a política de operação do sistema. Neste estudo, por operação do sistema entende-se a decisão de geração e conseqüente operação dos reservatórios num horizonte de longo prazo, com intervalos de tempo mensais. A este conjunto de características dá-se o nome de operação energética de sistemas hidrelétricos de potência [1].

Sob o ponto de vista da operação energética, somente as usinas com reservatório de acumulação podem variar a quantidade de água armazenada em seus reservatórios. Assim, para realizar a operação média mensal do sistema, deve-se controlar os volumes das usinas de Jurumirim, Chavantes e Capivara.

A regra de operação classicamente adotada pelo setor elétrico brasileiro é a Regra Paralela (RP), onde as usinas definem suas vazões turbinadas de forma a manterem iguais percentuais de volume nos reservatórios de acumulação. Definindo λ como sendo o fator de acoplamento entre as usinas, com $0 \leq \lambda \leq 1$, a regra paralela pode ser escrita conforme a Equação 1.

$$x(\lambda) = \underline{x} + \lambda \cdot (\bar{x} - \underline{x}) \quad (1)$$

sendo:

- $x(\lambda)$: volume determinado em função do fator de acoplamento, em hm^3 ;
- \underline{x} : volume mínimo operativo da usina, em hm^3 ;
- \bar{x} : volume máximo operativo da usina, em hm^3 .

Para que as regras de operação incorporem critérios de otimização, procura-se fazer com que expressem, de alguma forma, o comportamento operativo ótimo dos sistemas. Assim, escolheu-se um fator de acoplamento relacionando o estado de cada reservatório com a energia armazenada no sistema total. Estabelece-se assim uma relação física entre as variáveis a serem utilizadas na regra: o dado de entrada é a energia armazenada no sistema e a resposta, determinada pela regra, é o volume de cada reservatório. Esta nova regra, mostrada em (2), pode ser entendida como uma generalização de (1).

$$x(\lambda) = \underline{x} + f_i(\lambda) \cdot (\bar{x} - \underline{x}) \quad (2)$$

As funções $f_i(\lambda)$ expressam as regras de operação obtidas com base nos resultados da otimização. Inicialmente, o sistema completo é otimizado sobre as mais diversas condições hidrológicas possíveis. Em seguida, ajustam-se curvas sobre as nuvens de pontos criadas grafando-se o volume armazenado de cada usina em função da energia armazenada no sistema. Após ajuste de curvas pelos pontos, obtém-se as funções $f_i(\lambda)$.

Na Figura 4 mostra-se um exemplo da nuvem de pontos e a regra de operação ajustada para a usina de Jurumirim. Para obter a nuvem de pontos a operação do sistema foi otimizada entre os anos de 1931 e 2000. Para ajustar a regra foi utilizado um método baseado em Lógica Fuzzy [2].

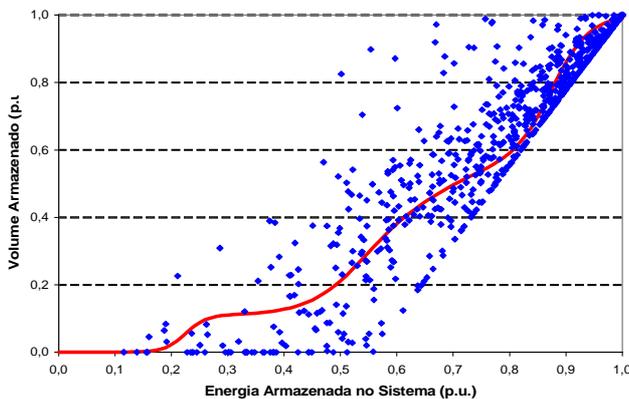


Figura 4 – Nuvem de pontos e regra ajustada para Jurumirim.

Na Figura 5 apresentam-se as regras das usinas de Jurumirim, Chavantes e Capivara. Pelo formato das curvas, ao reduzir-se o fator de acoplamento do valor máximo (1) até zero, nota-se que as regras baseadas em otimização (ROs) determinam que Capivara permaneça cheia a maior parte do tempo; que Jurumirim esvazie-se tão logo λ seja reduzido, e que Chavantes apresente um comportamento intermediário. Nota-se, portanto, que o uso a solução ótima na obtenção de regras de operação de reservatórios apresenta resultados diferentes daqueles encontrados com a regra paralela.

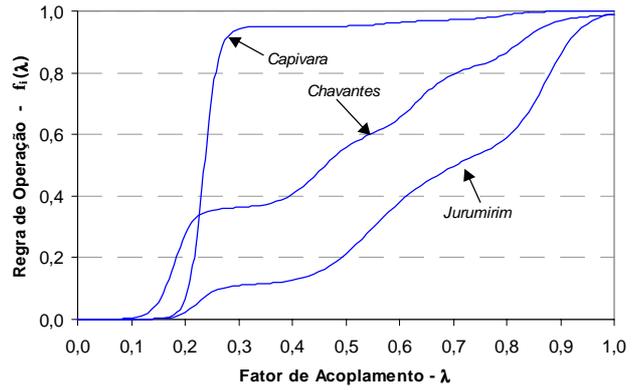


Figura 5 – Regras para as três usinas.

VI. MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação tem como objetivo comparar as performances da RO e da RP. Para tanto, calculam-se os valores de Energia Firme das usinas do rio Paranapanema considerando-se estas duas regras de operação e comparam-se os resultados [3].

Embora atualmente os valores contratuais das empresas do setor elétrico brasileiro sejam calculados através de critérios probabilísticos, onde a Energia Firme foi substituída pela Energia Assegurada, o cálculo da Energia Firme com diferentes regras de operação permite que estas políticas sejam comparadas.

O modelo de simulação utiliza o fator de acoplamento λ para determinar a vazão turbinada pelas usinas. A cada intervalo de tempo, se a geração total proporcionada pela ação de turbinar toda a água que está sendo defluída, em todas as usinas, for igual à meta de geração, incrementa-se t ; caso contrário, altera-se λ da seguinte forma:

- *Excesso de geração*: se a geração hidroelétrica total é maior que o mercado D, eleva-se λ de forma a armazenar o excesso de água e reduzir a vazão turbinada, com conseqüente redução de geração. Se λ igualar-se a um, indicando que todos os reservatórios estão cheios, e ainda houver excesso de água, este excesso é vertido.
- *Déficit de geração*: se a geração hidroelétrica total é menor que o mercado, reduz-se λ de forma a utilizar a água dos reservatórios e elevar a vazão turbinada, com conseqüente elevação da geração. Se λ igualar-se a zero, indicando que todos os reservatórios estão vazios, e ainda a geração total do sistema for menor que o mercado, caracteriza-se um déficit de suprimento.

Na próxima seção são mostrados os resultados da simulação da cascata de usinas do rio Paranapanema.

VII. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos com a simulação de todas as oito usinas pertencentes à cascata do rio Paranapanema. Na Tabela 1 mostram-se os dados do Período Crítico para este caso. De acordo com os valores apresentados nesta tabela, obtém-se os seguintes índices de benefício do uso das regras não paralelas:

$$B_{RO} = 923,44 - 914,68 = 8,76 \text{ MW}$$

$$B_{RO,\%} = \frac{8,76}{914,68} \cdot 100 = 0,96\%$$

TABELA 1 – PERÍODO CRÍTICO COM TODAS AS USINAS DA CASCATA.

	RP	RO
Início do Período Crítico	Jan/43	Jan/43
Fim do Período Crítico	Set/45	Set/45
En. Arm. Início PC (MW.mês)	6276,35	6276,35
Em. Arm. Fim PC (MW.mês)	0,07	5,47
Energia Firme (MW)	914,68	923,44
Energia Secundária (MW)	330,01	324,35
Geração Média (MW)	1244,69	1247,79

Comparando os benefícios decorrentes da utilização da RO para o sistema todo e somente para as usinas a reservatório, observa-se que a presença das usinas a fio d'água reduz o benefício relativo da RO. Isto ocorre porque as regras de operação atuam diretamente somente sobre as usinas com reservatório de acumulação, o que significa que a RO altera diretamente a operação apenas de cerca de 50% da potência instalada de toda a cascata. Assim, os benefícios proporcionados pela RO acabam sendo "dissolvidos" quando comparados a toda a cascata.

Todavia, o benefício de 0,96% pode ser classificado como significativo se for considerado que o ganho de Energia Firme é um resultado único e exclusivo da regra de operação. Tem-se o mesmo sistema, os mesmos dados de modelagem, as mesmas vazões afluentes e a mesma metodologia de simulação; a única alteração é a regra de enchimento/esvaziamento.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 2, nota-se que as variações de energia ocorrem sensivelmente nas usinas a reservatório. As duas usinas de cabeceira, Jurumirim e Chavantes, apresentam valores de Energia Firme menores quando operadas com a RO que quando operadas com a RP. Para a usina de Capivara ocorre exatamente o contrário. Além disto, de acordo com as variações apresentadas, o ganho do sistema provém do acréscimo de Energia Firme de Capivara.

TABELA 2 – ENERGIA FIRME PARA TODAS AS USINAS DA CASCATA.

Usina	Energia Firme (MW)		Melhora da RO	
	RP	RO	MW	%
Jurumirim	48,55	47,17	-1,38	-2,84
Chavantes	155,23	153,35	-1,88	-1,21
Canoas II	41,46	41,11	-0,35	-0,84
Canoas I	49,93	49,52	-0,41	-0,82
S. Grande	49,28	48,85	-0,43	-0,87
Capivara	258,83	273,23	14,40	5,56
Taquaruçu	161,22	160,63	-0,59	-0,37
Rosana	150,17	149,58	-0,59	-0,39

Finalmente, os valores de Energia Secundária são mostrados na Tabela 3. Os valores mostram que todas as usinas apresentam ganhos de Energia Secundária quando operadas com a RP, exceto a usina de Capivara.

TABELA 3 – ENERGIA SECUNDÁRIA PARA TODAS AS USINAS DA CASCATA.

Usina	E. Secundária (MW)		Melhora da RO	
	RP	RO	MW	%
Jurumirim	14,62	15,20	0,58	3,97
Chavantes	46,69	48,61	1,92	4,11
Canoas II	9,39	9,91	0,52	5,54
Canoas I	12,11	12,71	0,60	4,95
S. Grande	10,07	10,71	0,64	6,36
Capivara	121,66	111,37	-10,29	-8,46
Taquaruçu	59,07	59,26	0,19	0,32
Rosana	56,41	56,58	0,17	0,30

VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a utilização de um modelo de otimização para estudo e compreensão do planejamento energético ótimo das usinas localizadas no Rio Paranapanema. Através de estudos realizados sobre todo o histórico de vazões, a solução ótima do problema de planejamento energético foi utilizada na criação de regras não paralelas para operação dos reservatórios. O benefício das regras no cálculo da energia firme é de 0,96%. Este resultado pode ser classificado como significativo se for considerado que o ganho de energia firme é um resultado único e exclusivo da regra de operação. Os resultados apontam para a constatação de que a operação paralela dos reservatórios não é adequada ao objetivo de utilizar os recursos naturais da melhor forma possível.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.A.F.M.C. Carneiro and S. Soares, *Reservoir operation rules for hydroelectric power system optimization*, presented at IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Athens, Greece, 1993.
- [2] A.A.F.M.C. Carneiro and D. da Silva Filho, *Fuzzy Logic Applied to Operation Rules for Large Hydrothermal Power Systems*, presented at International Conference on Power System Technology POWERCON'98, Beijing, China, 1998.
- [3] D. da Silva Filho and A.A.F.M.C. Carneiro, *Sistema de Apoio à Decisão para Simulação da Operação de Sistemas Hidroelétricos de Geração*, apresentado no XX CILAMCE - Congresso Ibero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia, São Paulo - SP, 1999
- [4] M.A. Cicogna, *Modelo de Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos a Usinas Individualizadas Orientado por Objetos*. Tese de Mestrado. FEEC/UNICAMP, fevereiro, 1999.
- [5] S. Soares and A.A.F.M.C. Carneiro, *Optimal operation of reservoirs for electric generation*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, pp. 1101-1107, 1990.