

PLANEJAMENTO DA MOTORIZAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCHs), UTILIZANDO-SE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.

Afonso Henriques Moreira Santos

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Caixa Postal 50 - Itajubá - MG - Brasil

Sérgio Valdir Bajay

Universidade Estadual de Campinas
Cidade Universitária Zeferino Vaz - Campinas - SP - Brasil

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para se planejar uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) no que diz respeito ao seu número de máquinas e cronograma de motorização. Considera-se a possibilidade de geração Diesel (ou qualquer outra térmica). A técnica utilizada é a Programação Dinâmica, sendo que o custo de operação é levantado por um modelo simplificado. Todo o processo mantém um caráter expedito, típico para as PCHs.

PLANNING OF SMALL-SCALE HYDROPOWER STATIONS, WITH DYNAMIC PROGRAMMING

Abstract

This paper shows a methodology to plan small hydroelectric plants (PCHs). The number of generator groups and their start-up date are determined. The methodology can include other types of small electric plants, like Diesel motors. Dynamic Programming is employed to solve the model and the operational costs is calculated by Heuristic rules. All steps are simple and fast, typical of those plants.

1. INTRODUÇÃO

A atual crise energético-financeira levou alguns órgãos governamentais a incentivarem as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). O artigo aqui apresentado desenvolve uma metodologia, que estuda o número de máquinas da PCH, bem como define a data de entrada das mesmas. O enfoque é dado para as centrais supridoras de localidades isoladas, tipicamente abastecidas por grupos Diesel-elétricos. A geração hidro-térmica

nessas regiões pode ser comum, com combinações tipo PCH/Diesel. Estas combinações são importantes, e a entrada de um pequeno motor Diesel pode adiar maiores investimentos para se motorizar a PCH, justificando sua instalação. Assim, este trabalho expõe seu algoritmo, aplicando-o ao caso de uma localidade típica da Região Norte do Brasil, considerando a possibilidade de suprimento através de PCH, grupo Diesel e/ou combinação dos dois.

2. MÉTODOS DE PLANEJAMENTO DO PARQUE GERADOR

O planejamento da expansão do parque gerador utiliza basicamente as seguintes técnicas: Simulação com regras heurísticas (Olaussen et alli, 1981), Programação linear (Albuquerque et alli, 1982) Programação Dinâmica (Kuiper, 1973). Eventualmente outras técnicas são empregadas, como a Programação Não Linear. Entretanto, os dois primeiros processos são os que se firmaram, sendo que os modelos a longo prazo tem-se concentrado na PL. A metodologia empregada no modelo que aqui se descreve é inspirada no trabalho de Kuiper (1975), onde se emprega PD. Isto se deve ao fato de, com PD, haver grandes facilidades para incorporar regras operativas e equações de custos, lineares ou não. Também, para o caso presente o número de estados, normalmente, não ultrapassa 20, enquanto, para o planejamento do sistema como um todo, o número de estados é superior a 300.

3. A METODOLOGIA PROPOSTA

O modelo empregará o custo anual da central (A), que inclui o custo anual de operação (AO) mais o custo anual do investimento (AI). Este último é dado pela equação seguinte (3.1):

$$AI = I \cdot \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3.1)$$

Sendo "I" o investimento inicial, "i" a taxa real de juros, N a vida estimada para a central. Deve-se incorporar no "AI" também o custo anual relativo à manutenção e ao pessoal de operação.

O custo anual de operação (AO) dependerá de cada estado e não apenas da potência instalada, pois o consumo de óleo Diesel, por exemplo, depende da potência instalada na PCH, da disponibilidade hidroenergética e da taxa de fa-

lha dos grupos geradores. Assim, um determinado estado "m" possui uma potência instalada "P_m" composta por uma potência hidráulica "PH_m" e uma térmica "PT_m". A energia possível de ser gerada, no período de interesse, pela hidrelétrica (S₁ mais S₂) é mostrada na Fig. 3.1, onde a curva de duração da vazão já está linearizada e colocada em termos energéticos. No caso "a" a potência instalada na PCH (PH_m) é menor que a potência média do mercado (PM_m). Já no caso "b", PH_m é maior que PM_m.

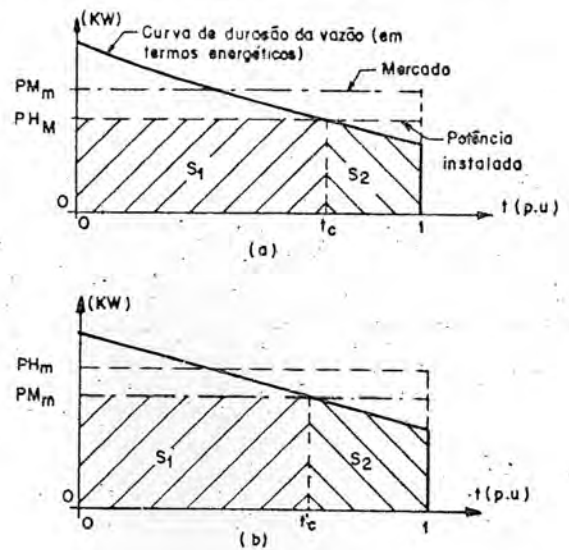


Fig. 3.1: Curva de permanência de vazão, potência média da carga e potência instalada na PCH.

As equações que serão agora apresentadas servem para determinar S'1 e S'2, que diferenciam de S1 e S2 pois consideram a taxa de saída dos grupos geradores. Entretanto essas equações não serão deduzidas aqui pois são motivo de um outro trabalho dos mesmos autores (Santos e Bajay, 1984) e fogem do objetivo principal deste artigo, que é o método de otimização da motorização. Assim sendo, (3.2) apresenta a energia es-

cia média do mercado (PM_m) para o estado "m".

$$EE_m = \sum_{k=1}^j \left\{ P(k) \cdot \left[t_c^2(k) \cdot PD_m(k) + (1-t_c(k))^2 \cdot \frac{(PD_m(k)+a+b)}{2} \right] \right\} \quad (3.2)$$

Sendo que:

$$DE_m = a \cdot t + b \quad (\text{reta de duração de vazão em termos energéticos}) \quad (3.3)$$

$$PD_m(k) = \frac{k}{j} \cdot PH_m \quad (\text{potência relativa a um número } k \text{ de máquinas}) \quad (3.4)$$

$$t_c(k) = \frac{PD_m(k)-b}{a} \quad (\text{duração, em p.u., que } DE_m \text{ é maior que } PH_m) \quad (3.5)$$

$$0 \leq t_c(k) \leq 1$$

$$P(k) = C_k^j \cdot (1-q)^k \cdot q^{j-k} \quad (\text{probabilidade de } k \text{ grupos estarem funcionando}) \quad (3.6)$$

Estas equações são para motorização com máquinas de mesmas características. Esta consideração é válida para todo o modelo aqui proposto.

Para o caso "b" da Fig. 3.1, (3.7) apresenta a energia esperada, com as mesmas considerações anteriores. O número mínimo de grupos, que geram uma potência instalada maior que o mercado médio, é " $l + 1$ "

$$EE_m = \sum_{k=1}^l \left\{ P(k) \cdot \left[t_c^2(k) \cdot PD_m(k) + (1-t_c(k))^2 \cdot \frac{(PD_m(k)+a+b)}{2} \right] \right\} + \sum_{k=l+1}^j \left\{ P(k) \right\} \cdot \left\{ t_c'^2 \cdot PM_m + (1-t_c')^2 \cdot \frac{(PM_m+a+b)}{2} \right\} \quad (3.7)$$

onde,

$$t_c' = \frac{PM_m-b}{a} \quad (\text{duração, em p.u., que } DE_m \text{ é maior que } PM_m) \quad (3.8)$$

$$0 \leq t_c' \leq 1$$

e todas as demais variáveis já foram

definidas.

Observe que t_c' não depende de "k" pois, a partir do ponto que o número de máquinas soma potência maior que PM_m , quem o define é o cruzamento da reta de mercado com a reta de vazão. Note, também, que a contribuição de um número de máquinas superior a " $l+1$ " para a energia esperada é apenas melhoria da confiabilidade, refletida pelo somatório das probabilidades no segundo termo de (3.7). Não há um maior aproveitamento da disponibilidade energética.

Tudo que foi dito com relação à EE_m é para se determinar qual o consumo de combustível das térmicas em um estado "m". Para isto supõe-se que a energia exigida pelo mercado tem que ser fornecida pela PCH ou pela térmica. Então, (3.9) mostra como calcular a energia esperada dos grupos térmicos, no estágio "m", (ET_m), com a restrição (3.10)

$$ET_m = PM_m - EE_m \quad (3.9)$$

$$ET_m \leq PT_m \quad (3.10)$$

(3.10) não considera a taxa de saída dos grupos, pois é admitido que quando sai um existe reserva hidráulica. Entretanto não é difícil incluir este aspecto no modelo. Finalmente, pode-se determinar o custo anual de operação (AO_m), em função do consumo específico das térmicas (CE) e do preço do combustível (PC).

$$AO_m = ET_m \cdot CE \cdot PC \quad (3.11)$$

AO_m depende do mercado, o que implica numa dependência do estágio.

Satisfeitos os requisitos energéticos, e definida a participação térmica, deve-se cumprir o requisito de ponta. (3.12) é a restrição de ponta em cada estágio, que é dada em função do fator de carga do estágio (FC), pois os autores preferem trabalhar com a previsão deste número (ver Tolley, Upton e Has

tings, 1977).

$$PH_m + PT_m \geq \frac{PM_m}{FC} \quad (3,12)$$

Falta agora definir os possíveis estados para a PD. Seja o caso de uma PCH onde está por se definir o número de máquinas em 3 ou 5. Os vetores seguintes mostram os possíveis estados.

$$3 \text{ m\u00e1q.} \rightarrow [1 \text{ M} \quad 2 \text{ M} \quad 3 \text{ M}]'$$

$$5 \text{ m\u00e1q.} \rightarrow [1 \text{ M} \quad 2 \text{ M} \quad 3 \text{ M} \quad 4 \text{ M} \quad 5 \text{ M}]'$$

N\u00e3o h\u00e1 possibilidades de combina\u00e7\u00f5es entre os vetores, pois eles s\u00e3o excluidos: ou a PCH tem 3 m\u00e1quinas ou 5. Enfim, na busca da trajet\u00f3ria \u00f3tima, o controle nunca pode jogar de um estado referente \u00e0 motoriza\u00e7\u00e3o com 3 grupos para um referente a 5 grupos, no est\u00e1gio posterior. A Fig. 3.2 mostra as trajet\u00f3rias que definem as motoriza\u00e7\u00f5es, nos casos hipot\u00e9ticos de 3 e 5 m\u00e1quinas. O controle que leva de (4,5) a (5,5), indicado com linha pontilhada, \u00e9 infect\u00edvel.

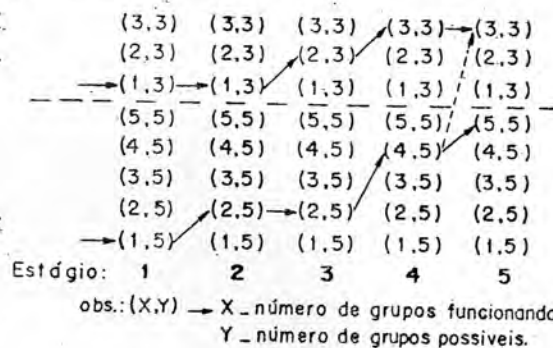


Fig. 3.2: Esquema \u00f3timo de motoriza\u00e7\u00e3o para a PCH com 3 e 5 m\u00e1quinas.

Dois pontos ficam evidenciados nesta explana\u00e7\u00e3o: o primeiro \u00e9 que, na verdade, foram feitas duas PD distintas, uma para 3 grupos e outra para 5. Isto \u00e9 verdade para quantas sejam as hip\u00f3teses propostas para an\u00e1lise.

O segundo \u00e9 que o resultado \u00f3timo global \u00e9 o melhor entre os \u00f3timos parciais. Observe que a defini\u00e7\u00e3o do n\u00famero de m\u00e1quinas \u00e9 uma tarefa "passo-a-passo".

A inclus\u00e3o de t\u00e9rmicas n\u00e3o muda a caracter\u00edstica de separabilidade rec\u00e9m descrita. As t\u00e9rmicas se combinar\u00e3o, independentemente, com a op\u00e7\u00e3o de 3 e 5 m\u00e1quinas. A Fig. 3.3 mostra a op\u00e7\u00e3o "5 grupos" combinada com 2 motores Diesel.

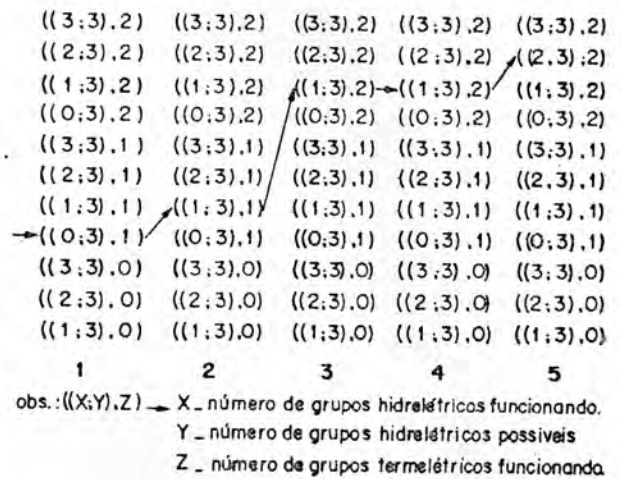


Fig. 3.3: Esquema \u00f3timo de motoriza\u00e7\u00e3o para PCH com 3 m\u00e1quinas e 2 grupos Diesel.

O processo proposto \u00e9 "Forward" e algumas considera\u00e7\u00f5es devem ser tecidas para reduzir os n\u00fameros de estados e controles pesquisados a cada est\u00e1gio. Primeiramente, tem-se que satisfazer a restri\u00e7\u00e3o de ponta, sendo, pois, in\u00fatil pesquisar estados que n\u00e3o satisfa\u00e7am (3.12). Em segundo, deve-se procurar os controles que levem ao estado pesquisa do partindo de um estado menos desenvolvido. Isto \u00e9, n\u00e3o se vai procurar um controle que leve a um estado contendo 2 grupos hidrel\u00e9tricos partindo de um estado que cont\u00eam 3 destes grupos. Finalmente, embora n\u00e3o seja garantido a otimismo deste procedimento, n\u00e3o \u00e9 necess\u00e1rio pesquisar estados que cont\u00eam um n\u00famero de grupos somando uma pot\u00eancia que n\u00e3o seja a m\u00ednima para atender a ponta. Ou seja, um estado que, ainda com alguma m\u00e1quina fora, tenha condi\u00e7\u00e3o de satisfazer a demanda. Esta t\u00e9cnica, recomendada por Kuiper (1973) para seu problema, pode n\u00e3o satisfazer

aqui, pois considera-se o efeito da confiabilidade, o que não é levado em conta por ele. Então, um maior número de máquinas pode diminuir o custo das termicas, pois aumenta a confiabilidade e tem mais condições de aproveitar a disponibilidade hidrenergética.

O número de estágios será determinado a medida que for se desenvolvendo a PD. Enquanto a PCH não for inteiramente absorvida pelo mercado, deve-se ir pesquisando novos estágios. Com a metodologia proposta não há necessidade de se somar algum tipo de valor terminal, pois não existem créditos a serem computados. Isto se deve ao fato de se trabalhar com custos anuais, que tem embutido o conceito da reposição contínua do equipamento. Finalmente, uma maneira clássica de apresentar uma PD é através de sua equação recursiva. Esta é apresentada em (3.13), onde o custo total mínimo, para o estado "m", no período "t", $(C_{m,t}^*)$, é a soma do custo anual, do estado "m", no período "t", $(A_{m,t})$, com o menor custo entre os estados do estágio anterior $(C_{n,t-1})$. Só que no estágio anterior só se consideram os estados "n" que podem dar origem ao estado "m", sem desativação de grupos. Daí a representação no controle do índice "n ≤ m", informando que o estado "n" é menos (ou igualmente) desenvolvido que "m". A técnica de busca do "ótimo" utilizada pesquisa os estados "n", e não os controles "u".

$$C_{m,t}^* = A_{m,t} + \text{Min}_{u(n \leq m)} C_{n,t-1} \quad (3.13)$$

O item seguinte apresenta um caso de aplicação que ajudará o entendimento da técnica proposta.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Seja o caso de uma PCH com 3 máquinas de 500 kW com possibilidade de gerar em conjunto com 2 grupos Diesel de

200 kW cada. Os dados disponíveis são:

$$DE = -460 t + 610; \quad q = 0,02; \quad CE = 2,4 \text{ Ton/kWano}; \quad PC = 500 \$/\text{Ton}; \quad i = 10\% \text{ a.a.}$$

A Tab.4.1 apresenta os custos anuais do investimento para os estados.

Tab.4.1: Custos anuais do investimento para cada estado (\$)

1	$((0,3), 0)$ 9.400	$((0,3), 1)$ 18.800
2	$((1,3), 0)$ 141.200	$((1,3), 1)$ 150.600
3	$((2,3), 0)$ 181.540	$((2,3), 1)$ 190.940
4	$((3,3), 0)$ 221.880	$((3,3), 1)$ 231.280

OBS.: As linhas e colunas estão numeradas para facilitar a referência aos estados. Então, o estado 32 é $((2,3), 1)$.

Note que a entrada da primeira máquina da PCH é muito mais cara que as demais, pois é necessária toda a estrutura civil da PCH pronta.

A previsão de mercado está na Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Previsão de mercado.

ano	1	2	3	4	5
energia [kW]	50	150	300	600	1000
FC	0,5	0,35	0,4	0,4	0,45

A Tab. 4.3 apresenta um resumo da PD, baseando-se nos dados recém fornecidos e nas equações do item anterior.

Está definido, pois, o programa da motorização, instalando, primeiramente, um grupo Diesel. Após entra o primeiro grupo da PCH; no estágio terceiro entra outro Diesel e, finalmente, no último estágio entram as duas últimas unidades da PCH.

Com relação ao exemplo, algumas observações devem ser feitas:

- em apenas 4 estágios a PCH foi totalmente solicitada;

Tab. 4.3: Resumo da Programação Dinâmica
OBS.: "I" ineficaz por ferir alguma
restrição.

estado atual	estado para gerar o atual	custo de operação	custo total
Estágio 1			
11	I	—	—
12	11	36.000	45.400(*)
13	11	36.000	54.800
21	11	1.400	142.640
22	11	720	151.320
23	11	720	160.720
31	11	30	181.569
32	11	15	190.955
33	11	15	200.355
41	11	0	221.880
42	11	0	231.280
43	11	0	240.680
Estágio 2			
11	I	—	—
12	I	—	—
13	I	—	—
21	21	4.320	302.424
22	12	2.160	202.700(*)
23	12	2.160	212.100
31	21	86	338.530
32	12	43	240.923
33	12	43	250.323
41	21	0	378.784
42	12	0	281.220
43	12	0	290.620
Estágio 3			
11	I	—	—
12	I	—	—
13	I	—	—
21	I	—	—
22	I	—	—
23	22	102.960	485.930(*)
31	21	201.882	716.088
32	22	100.941	514.851
33	22	100.941	524.251
41	21	201.306	755.852
42	22	100.653	554.903
43	22	100.653	564.303
Estágio 4			
11	I	—	—
12	I	—	—
13	I	—	—
21	I	—	—
22	I	—	—
23	I	—	—
31	I	—	—
32	I	—	—
33	I	—	—
41	31	345.600	1.527.977
42	32	201.600	999.216
43	23	172.800	948.003(*)

(*) caminho ótimo.

- foi considerado um custo de "deficit" igual ao dobro do custo do "kW" do Diesel. Esta penalidade foi facilmente colocada no modelo;
- a probabilidade de 3 grupos falharem simultaneamente foi considerada nula;
- quando se soma o custo total de um estado do estágio anterior, tem-se que considerar os juros do período.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

É evidente a robustez do método, podendo o mesmo incorporar as mais diferentes considerações. Entretanto, a definição do número de máquinas não está tão bem delineada como a programação da motorização, pois tem-se que "rodar" o modelo para diferentes números de grupos, escolhendo o melhor. Esta busca não deve ser aleatória. Sugere-se que maiores estudos devem ser feitos, explorando uma tendência de convexidade do custo total em função do número de máquinas.

6. BIBLIOGRAFIA

- Albuquerque, J & Trinkenreich, J & Pinheiro, S(1981). "Modelo de análise da expansão a longo prazo do sistema interligado brasileiro". Eletrobrás, Brasil.
- Kuiper, J.(1973). "Analysis of alternative sequences of hydroelectric power developments; Ph.D Thesis". Stanford University, U.S.A.
- Olaussem, E & Haugstad, A(1982). "Detailed simulation model discharge strategies", EFI, Noruega.
- Santos, A.H.M & Bajay, S.V, (1984). "Determinação da potência a ser instal. em PCHs". Brasil CBE/84 - Brasil.
- Yolley, J.S & Upton, C.W. & Hastings, V.S, (1977). "Electric Energy Availability and Regional Growth". Ballinger Pub.Co., Massachusetts, U.S.A.