PROBLEMA DE BOMBAGEM HIDROELÉCTRICA.

ALGUNS ASPECTOS ENERGÉTICOS, TÉCNICOS E ECONÓMICOS *

0 — Introdução.

Como se sabe o aumento crescente do consumo da energia eléctrica conduz à instalação de potências elevadas para fornecimento da energia de base dos diagramas de consumo. A exploração dessas centrais pode ser antieconómica se os factores de utilização a que trabalham forem baixos devendo, portanto, procurar-se soluções para o melhoramento dessas utilizações tendo sempre em conta a sua conjugação com as centrais já existentes.

Este problema do melhoramento das utilizações começou a apresentar-se com maior acuidade desde que se tornou necessário instalar potências cada vez mais elevadas e de custo alto como as de origem nuclear.

Uma das soluções praticadas há já bastante tempo (em 1877 já existia um esquema de bombagem em Letten perto de Zurique) e muitas vezes adoptada quando existem condições para isso, solução que, como veremos, tem extraordinário interesse quando as centrais de base são de origem nuclear, é a que corresponde à utilização de bombagem para transferir a energia das centrais de base disponível nos vazios do diagrama, para as horas da ponta onde ela é necessária. Consegue-se assim que as centrais de base trabalhem com uma melhor utilização, sendo, é claro, necessário em contrapartida criar reservatórios adequados de armazenamento,bem como instalar o equipamento para a bombagem e turbinagem.

Entre os vários estudos sobre a viabilidade económica da solução apontada há que distinguir os estudos do Dr. Charles Jaeger, da English Electric Company, Limited, quer pela sua exposição ordenada da teoria ilustrada com vários exemplos práticos quer pela generalidade com que abordam os problemas permitindo dar ao leitor uma visão de conjunto.

O trabalho que se apresenta a seguir e que intitulamos «Problema de Bombagem Hidroeléctrica. Alguns Aspectos Energéticos, Técnicos e Económicos» tem pouco de original, sendo uma sistematização da documentação recolhida dos trabalhos de Jaeger e de outros citados na Bibliografia que figura no fim do artigo; mas mesmo assim pareceu-nos útil a sua publicação atendendo a que pouco existe publicado na nossa língua sobre este assunto.

O presente trabalho realizado nos Serviços de Energia da Companhia Nacional de Electricidade estava na sua origem desenvolvido em 5 capítulos:

1) Factor de carga na análise de sistemas de produção de energia eléctrica.
2) Armazenamento por bombagem. Teoria e aplicações.
3) Algumas considerações sobre esquemas de bombagem e sua economia.
4) Problemas de rendimento na bombagem.
5) Dados técnicos sobre esquemas existentes e sobre a evolução futura do equipamento a utilizar.

Publicam-se, porém, sòmente os primeiros três capítulos por serem os de carácter mais geral.

Ao terminar esta introdução queremos apresentar os nossos agradecimentos à Administração da Companhia Nacional de Electricidade que autorizou a publicação deste trabalho, ao Engenheiro F. Ivo Gonçalves, Chefe dos Serviços de Energia, cujo sábio conselho sempre nos assistiu na elaboração deste estudo e ao Engenheiro J. Cruz Morais pelas valiosas críticas e sugestões que fez na revisão deste trabalho.

1 — Factor de carga na análise de sistemas de produção de energia eléctrica.

1.1 — Factor de carga. Definição e algumas relações importantes.

Define-se factor de carga θ dum sistema pela relação $\theta = \frac{1}{MT}\int_0^T N dt$ e representa a percentagem de tempo em relação ao tempo T, durante o qual o sistema deveria trabalhar com a potência máxima M para produzir a energia $\int_0^T N dt$. É claro que N representa a potência instantânea de forma que o integral corresponde à energia produzida pelo sistema ao fim do tempo T. A interpretação geométrica é evidente: a área do rectângulo de lados M e θT é igual à área limitada pela curva $N(t)$, ordenadas $t = 0$ e $t = T$ e pelo eixo dos t.

---

* Para a publicação de algumas das gravuras com que se ilustra este artigo foi o seu autor gentilmente autorizado pelo Dr. Charles Jaeger, Engenheiro consultor da English Electric C°. Ltd., a utilizar os gráficos dos seus artigos *The Correlation of Nuclear, Thermal and Pumped-Storage Capacity* e *Pumped Storage Capacity correlated to Base-Load Electric Energy Generation: A Simplified Mathematical Approach*, publicados respectivamente nas revistas «Water Power» de Junho de 1958 e «The Institution of Civil Engineers» — Proceedings de Novembro de 1959.

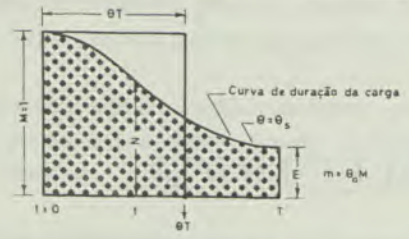


Fig. 1

Suponhamos que um sistema tem um factor de carga θ_S. Seja M a potência máxima verificada ao longo do período T e $m=\theta_O M$ a potência mínima; a curva cronológica dando a potência N em função de t permite-nos traçar a correspondente curva de duração (1) relativa ao mesmo período T (fig. 1).

Na maioria dos casos a energia total é produzida por várias centrais com características diferentes; algumas delas serão classificadas como centrais de base e outras como centrais de ponta, tendo as primeiras um factor de carga elevado enquanto as segundas têm um factor de carga baixo. Assim a área correspondente ao diagrama de carga (curva cronológica da potência) aparece subdividida pelas várias centrais; da mesma forma a área da curva de duração, aparece subdividida em áreas parciais que correspondem às várias centrais. Note-se que as curvas definidas pelas ordenadas entre as linhas que limitam estas áreas não são geralmente curvas de duração parciais (figs. 2 e 3).

Fig. 2

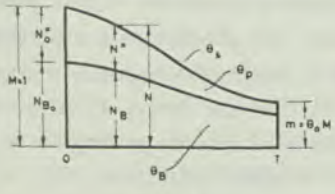


Fig. 3

Estudemos agora mais pormenorizadamente o que acabamos de dizer:

a) Suponhamos o caso de duas centrais; a cada uma delas corresponderá uma área parcial das duas áreas em que fica dividida a área limitada pela curva de duração.

Em cada instante a potência N será igual a N_B+N_P, representando N_B a potência de base e N_P a potência de ponta. Para $t=0$ será $M=N_{BO}+N_{PO}$. Designando o máximo de N_P por $N_P\ max$ e o de N_B por $N_B\ max$, ter-se-á geralmente $N_P\ max = N_{PO}$ e $N_B\ max = N_{BO}$.

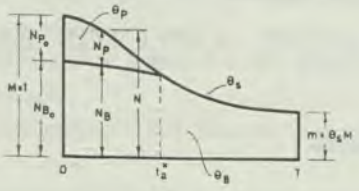


Fig. 4

Definimos agora os 3 factores de carga:

$$\theta_S = \frac{1}{MT}\int_0^T N\,dt \qquad \text{para o sistema}$$

$$\theta_P = \frac{1}{N_P\,T_{max}}\int_0^T N_P\,dt \qquad \text{para a central de ponta}$$

$$\theta_B = \frac{1}{N_B\,T_{max}}\int_0^T N_B\,dt \qquad \text{para a central de base}$$

Substituindo N_P pelo seu valor $N-N_B$ na expressão de θ_P tem-se:

$$\theta_P = \frac{1}{N_P\,T_{max}}\int_0^T (N-N_B)\,dt = \frac{1}{N_P\,T_{max}}\int_0^T N\,dt - \frac{1}{N_P\,T_{max}}\int_0^T N_B\,dt$$

portanto

$$\theta_P = \frac{1}{N_P\,T_{max}}\,MT\theta_S - \frac{1}{N_P\,T_{max}}\,N_{B\,max}\,T\theta_B \qquad \text{donde}$$

$$\boxed{\theta_P = \frac{M}{N_{P\,max}}\,\theta_S - \frac{N_{B\,max}}{N_{P\,max}}\,\theta_B} \qquad (1)$$

que é uma fórmula importante na análise dos factores de carga de sistemas.

Na maioria dos casos, como se disse, é $N_{P\,max} = N_{PO}$ e $N_{B\,max} = N_{BO}$ e (1) toma a forma

$$\theta_P = \frac{M}{N_{PO}}\,\theta_S - \frac{N_{BO}}{N_{PO}}\,\theta_B \quad \text{e fazendo } M=1=N_{BO}+N_{PO} \text{ vem}$$

$$\theta_P = \frac{1}{1-N_{BO}}\,\theta_S - \frac{N_{BO}}{1-N_{BO}}\,\theta_B \qquad \text{portanto}$$

$$\boxed{\frac{\theta_P}{\theta_B} = \frac{1}{1-N_{BO}}\,\frac{\theta_S}{\theta_B} - \frac{N_{BO}}{1-N_{BO}}} \qquad (2)$$

(1) Esta curva é obtida marcando em ordenadas a potência N e em abcissas o tempo durante o qual a potência foi superior ou igual a N

A equação (2) estabelece uma relação linear entre θ_P/θ_B e θ_S/θ_B; a dependência entre θ_P/θ_B e N_{BO} é representada por uma hipérbole. Antes de darmos as representações gráficas correspondentes às hipóteses de $\theta_S/\theta_B = cte$ e $N_{BO} = cte$, convém notar que é $\theta_P/\theta_B = 0$ para $N_{BO} = \theta_S/\theta_B$; para $N_{BO}=0$ é $\theta_P/\theta_B = \theta_S/\theta_B$, isto é $\theta_P = \theta_S$; para $N_{BO}=1$ ($N_{PO}=0$) e dentro da hipótese considerada de ser $N_{PO} = N_{P\,max}$, virá $N_P = 0$, o que corresponde a existir só a central de base e não tendo portanto significado a equação (2). Para se obter $N_{BO} > 0$ tem de ser $(\theta_S/\theta_B - \theta_P/\theta_B):(1 - \theta_P/\theta_B) > 0$.

A representação de (2) considerando θ_P/θ_B e N_{BO} como variáveis e θ_S/θ_B como parâmetro dá uma família de hipérboles, enquanto a representação de (2) considerando θ_P/θ_S e θ_B/θ_S como variáveis e N_{BO} como parâmetro dá uma família de rectas (figs. 5 e 6).

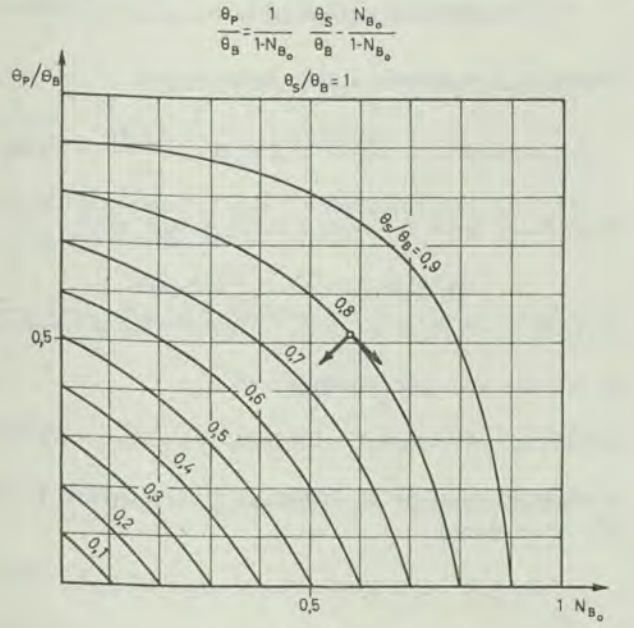


Fig. 5

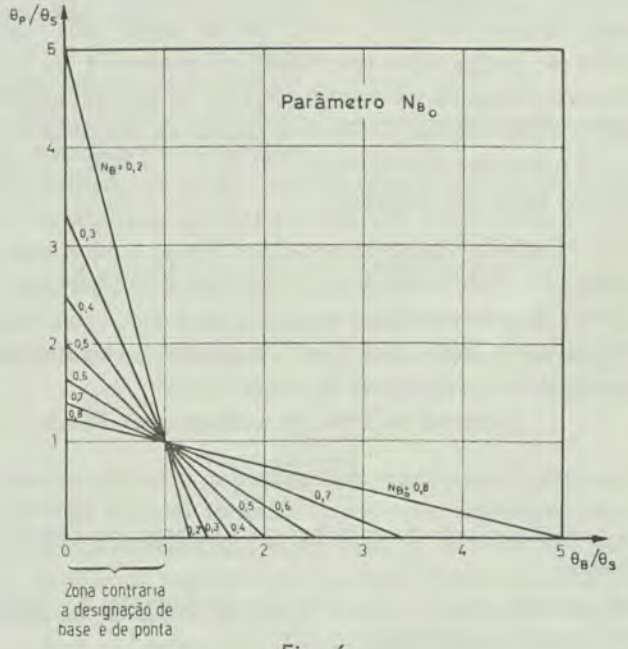


Fig. 6

Realmente só interessa considerar os casos em que $\theta_B/\theta_S > 1$. O caso em que $\theta_B = \theta_S$ corresponde a $\theta_S = \theta_P$.

Da representação da fig. 5 vê-se que aumentando N_{BO} e mantendo θ_S/θ_B, diminui θ_P/θ_B. Conclusões análogas podem ser tiradas da fig. 6.

b) Supondo agora o caso de 3 centrais (generaliza-se para o caso de mais centrais) às quais correspondem as potências N_B, N_i e N_P tem-se anàlogamente:

$$\theta_P = \frac{M}{N_{P\,max}}\theta_S - \frac{N_{i\,max}}{N_{P\,max}}\theta_i - \frac{N_{B\,max}}{N_{P\,max}}\theta_B \qquad (3)$$

com $M = N_{PO} + N_{iO} + N_{BO}$

e na hipótese de $N_{P\,max} = N_{PO}$, $N_{B\,max} = N_{BO}$, $N_{i\,max} = N_{iO}$ e $M = 1$ vem

$$\theta_S = N_{BO}\,\theta_B + N_{iO}\,\theta_i + \theta_P\,(1 - N_{BO} - N_{iO}) \qquad (4)$$

As fórmulas (3) e (4) não se prestam a uma representação gráfica simples, mas são úteis nas aplicações numéricas, como veremos.

Observações:

1) As fórmulas (1), (2), (3) e (4) são válidas independentemente da forma da curva de duração e das curvas de decomposição, *exceptuando-se* o caso em que elas se intersectam criando áreas de energia «negativa», isto é, quando não podemos afirmar que a energia total é igual à soma das energias correspondentes às curvas parciais (fig. 7). Embora se possam deduzir fórmulas análogas válidas para estes casos, não há interesse em fazê-lo.

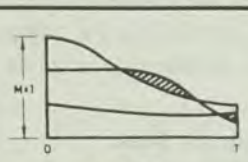


Fig. 7

2) As fórmulas (1), (2), (3) e (4) são válidas qualquer que seja a unidade de tempo T tomada para a definição de factor de carga. Em certos casos interessará $T = 24\ h$ ou $T =$

= 168 h (1 semana) como por exemplo no cálculo do volume de certos reservatórios de bombagem) noutros casos T = = 8760 h (1 ano).

Conhecidos θ_d, factor de carga de um dia de trabalho, θ_{we}, factor de carga de fim de semana, tem-se o factor de carga relativo a uma semana $\theta_{sem}(=5\theta_d N_d + 2N_{we}\theta_{we})/7N_d$(2). Conhecidos os factores de carga relativos às várias semanas do ano, tem-se o factor de carga anual:

$$\theta_a = \frac{\sum_1^{52} \theta_{sem\,i}\, N_i\, T_{sem}}{M \sum_1^{52} T_{sem\,i}} = \frac{1}{52}\,\frac{\Sigma\theta_{sem\,i}\, N_i}{M} \qquad \begin{matrix} T_{sem}=168\text{ h} \\ \sum_{i=1}^{52} T_{sem\,i}=8736\text{ h} \end{matrix}$$

1.2 — Introdução de uma nova fonte de energia num sistema.

Suponhamos um sistema com factor de carga θ_S e potências parciais N_1, N_2, N_3, ..., N_i e factores de carga θ_1, θ_2, ... θ_i. Seja $M = N_1 + N_2 + ... + N_i$. Se se insere uma nova fonte de energia cuja contribuição em potência é N_B e de factor de carga θ_B, no sistema anterior, ter-se-á inicialmente $M\theta_S = N_1\,\theta_1 + N_2\,\theta_2 + ... + N_i\,\theta_i$ e depois da introdução da nova fonte $(M+N_B)\;\theta'_S = \theta'_1\,N_1 + \theta'_2\,N_2 + ... + \theta'_i\,N_i + \theta_B\,N_B$. Temos agora por diferença

$$(\theta'_S - \theta_S)\,M + \theta'_S\,N_B = \sum_{p=1}^{i} (\theta'_P - \theta_P)\,N_P + \theta_B\,N_B$$

Agora, se se supõe que $\theta'_S = \theta_S$ e $\theta'_P = \theta_P$ — hipótese da permanência dos factores de carga — virá:

$$\theta_S = \theta_B$$

a nova fonte terá de trabalhar com o factor de carga do sistema.

Se se supõe que $\theta'_S = \theta_S$, mas que há variação do factor de carga da componente e vem:

$$\theta_S\,N_B = (\theta'_e - \theta_e)\,N_e + \theta_B\,N_B \qquad \text{donde}$$

$$\theta_B = \theta_S - \Delta\theta_e\,\frac{N_e}{N_B} \quad \text{com } \Delta\theta_e = \theta_e' - \theta_e$$

isto é, a nova fonte trabalhará com um factor de carga maior que o do sistema quando $\Delta\theta_e$ for negativo, isto é, quando houver diminuição do factor de carga da outra componente.

1.3 — Relacionamento do factor de carga com o custo da energia.

O custo de 1 kWh de energia eléctrica produzido por uma central ou um grupo i pode ser expresso da seguinte forma: $K_i = A_i/\theta_i + B_i$ em que A_i é uma constante que engloba os encargos relativos à instalação, manutenção, conservação, fomentação, exploração, etc., θ_i o factor de carga e B_i uma constante de proporcionalidade que corresponde a encargos proporcionais à energia produzida (por exemplo relativos ao combustível numa central térmica).

Qualquer variação de θ_i, de B_i, ou de A_i irá afectar K_i, variando as condições económicas de produção.

Considere-se um sistema com factor de carga θ_S alimentado por centrais térmicas de rendimentos diferentes. Uma central nova com rendimento maior deverá trabalhar com um factor de carga θ maior que θ_S. Se se junta agora ao sistema uma nova central N_B, por exemplo nuclear, e se queremos manter as condições de produção das centrais existentes, os θ referentes a essas centrais têm de se manter fixos e portanto será $\theta_B = \theta_S$ o que poderá ser uma *desvantagem*.

Examinemos agora as condições para que não haja variação do custo médio K do quilowatt-hora.

Esse custo médio, antes de se adicionar a nova fonte (N_B, θ_B), será dado por:

$$\sum_1^n E_i K_i = (\Sigma E_i)\,K \;\therefore\; (\Sigma E_i)\,K = \sum_1^n \frac{E_i A_i}{\theta_i} + \sum_1^n E_i B_i$$

Depois de se adicionar a nova fonte ter-se-á:

$$\left(\sum_i E'_i + E_B\right) K' = \sum_1^n \frac{E'_i A_i}{\theta'_i} + \sum_1^n E'_i B_i + \frac{E_B A_B}{\theta_B} + E_B B_B$$

Recordando que é $E_i = N_i\,\theta_i\,T$ e $E'_i = N_i\,\theta'_i\,T$ vem:

$$(\Sigma N_i)\,\theta_S\,K = \Sigma N_i A_i + \Sigma N_i B_i \theta_i$$

$$(\Sigma N_i)\,\theta'_S\,K' + N_B\,\theta'_S\,K' = \Sigma N_i A_i + \Sigma N_i B_i \theta'_i + N_B A_B + N_B B_B \theta_B$$

Se $\theta_S = \theta'_S$, vem por diferença

$$(\Sigma N_i)\,\theta_S\,(K' - K) + N_B \theta_S K' = \Sigma N_i B_i\,(\theta'_i - \theta_i) + N_B A_B + N_B B_B \theta_B$$

A condição para que se mantenha o custo médio é que $K = K'$ portanto

$$N_B\,\theta_S\,K' = \Sigma N_i B_i\,(\theta'_i - \theta_i) + N_B A_B + N_B B_B\,\theta_B$$

Se, por exemplo, houve variação do factor de carga da componente e, ter-se-á:

$$N_B\,\theta_S\,K = N_e B_e\,\Delta\theta_e + N_B A_B + N_B B_B\,\theta_B$$

equação que relaciona θ_S, θ_B e $\Delta\theta_e$ de molde a haver invariância do custo da energia do sistema.

Como aplicação do que se disse anteriormente vejamos o seguinte exemplo:

Considere-se o sistema representado na fig. 8, de potência total $M = 1$ e suponhamos $N_{BO} = 0{,}3$ e $N_{PO} = 0{,}7$. Se o factor de carga da central base é 0,9 e o do sistema é 0,45, pela fórmula (2) tem-se:

$$\theta_P = \frac{1}{1-0{,}3} \times 0{,}45 - \frac{0{,}3}{1-0{,}3} \times 0{,}9 = 0{,}257$$

(2) Supõe-se nesta definição que $N_d > N_{we}$, o que geralmente se verifica na prática

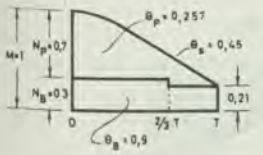


Fig. 8

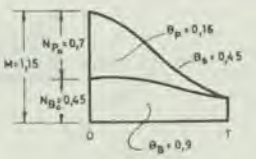


Fig. 9

Suponhamos agora que após uns anos a potência N_{BO} subiu de 50%, isto é, passou para 0,45, que θ_B é ainda 0,9 e que N_{PO} tem o mesmo valor bem como θ_S; pela fórmula (2) vem para θ_P o valor de 0,16. Como se vê há uma diminuição grande no valor de θ_P mas mesmo assim poderá haver vantagem em aumentar a potência de base, porque no custo K da energia de base o coeficiente B é baixo se forem centrais modernas enquanto o coeficiente A é baixo para centrais antigas fazendo as pontas.

Com efeito o custo médio da energia tem o valor

$$K = \frac{\left(\frac{A_P}{\theta_P} + B_P\right) N_{PO}\,\theta_P\,T + \left(\frac{A_B}{\theta_B} + B_B\right) N_{BO}\,\theta_B\,T}{M\,\theta_S\,T}$$

Supondo θ_S constante, $M = 1$ e não esquecendo que $M\theta_S = N_{PO}\,\theta_P + N_{BO}\,\theta_B$ vem

$$K = \left[A_P(1-N_{BO}) + B_P(1-N_{BO})\,\frac{\theta_S - N_{BO}\,\theta_B}{1-N_{BO}} + A_B N_{BO} + B_B N_{BO} A_B\right]\frac{1}{\theta_S}$$

portanto

$$K = \left[(A_P + B_P\theta_S) - N_{BO}(A_P + B_P\,\theta_B) + N_{BO}(A_B + B_B\,\theta_B)\right]\frac{1}{\theta_S}$$

donde

$$K = \left\{A_P + B_P\,\theta_S - N_{BO}\left[(A_P - A_B) + (B_P - B_B)\,\theta_B\right]\right\}\frac{1}{\theta_S}$$

o que mostra que K decresce quando cresce N_{BO} desde que $A_P - A_B + (B_P - B_B)\,\theta_B > 0$.

Note-se que se for $A_B > A_P$ e $B_B < B_P$ será $(A_P - A_B) - (B_B - B_P)\,\theta_B > 0$ quando $\theta_B > A_B - A_P / B_P - B_B$.

Consideremos ainda o mesmo sistema ao fim de mais alguns anos. O factor de carga $\theta_S = 0{,}45$. A carga base é gerada por uma central nuclear ($N_B = 0{,}25$). A potência de ponta é ainda $N_P = 0{,}7$ e a área intermédia corresponde a uma central térmica com $N_i = 0{,}55$. Supondo que $\theta_P = 0{,}15$, vem por aplicação de (4) e supondo $\theta_B = 1$, $\theta_i = 0{,}580$ o que é um factor de carga baixo para a central térmica (inicialmente era $\theta_i = 0{,}9$) (fig. 10).

Pondo $\theta_B = 0{,}70$, vem $\theta_i = 0{,}715$ que põe no mesmo pé a energia térmica e a nuclear.

Estas considerações têm certo interesse sobretudo na integração das centrais nucleares nos sistemas produtores de energia eléctrica. Muitos autores defendem a opinião de que a energia nuclear deve ser produzida com um factor de carga $\theta_B = 1$ enquanto a potência nuclear instalada não for maior que a potência mínima m da curva de duração. Ora essa opinião não parece correcta, pelo menos em sistemas com centrais térmicas a fazer a zona intermédia do diagrama de carga porque um tal critério poderia levar ao aumento do valor K do custo da energia. Assim pode haver vantagem em que a energia nuclear seja equilibrada por esquemas de armazenamento por bombagem ou outros processos de transferência de energia muito antes de a potência nuclear atingir a potência mínima m da curva de duração do sistema.

O problema que se vai analisar a seguir é:

Consideremos uma nova central base (possìvelmente nuclear) que vai ser instalada em associação com uma central de ponta (por bombagem) de forma que as duas centrais combinadas (consideradas como uma única unidade) têm uma potência N_O e um factor de carga $\theta < 1$. O problema que vamos tratar consiste em projectar a central de ponta de forma que a central de base de potência N_B seja utilizada ao máximo isto é com $\theta_B = 1$ ou próximo de 1. Este problema exige para a sua resolução o conhecimento da forma real da curva de duração.

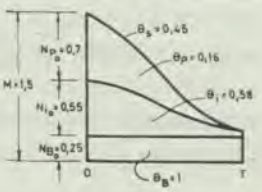


Fig. 10

1.4 — Aproximação analítica da curva de duração.

No estudo de vários problemas relacionados com a produção de energia eléctrica interessa conhecer ou determinar uma função cuja representação se aproxime da da curva de duração do sistema. Impõem-se, em primeiro lugar, as seguintes condições: o factor de carga obtido a partir da função e a relação θ_O da potência mínima para a máxima ([3]) têm de ser os mesmos. Será necessário depois que as variações das potências com o tempo se façam sensivelmente da mesma forma para que seja válida a aproximação.

Como se vê é um problema de interpolação resolúvel após o conhecimento da curva de duração de carga.

Todavia a maior parte das redes de países industrializados europeus podem ser representadas por uma das seguintes funções:

$$a) \qquad N = M\left[\theta_O + \frac{2}{\sqrt{\pi}}\left(\theta - \theta_O\right)\left(\log_e \frac{T}{t}\right)^{1/2}\right]$$

em que

M — potência máxima;

N — potência no intervalo t;

([3]) Suposta corrigida para ter em conta a ocorrência de casos anormais

θ_0 — relação entre a potência mínima e a máxima;
T — período a que se refere a curva de duração;
θ — factor de carga.

b) função de SOSCHINSKI

$$N = M\left[1-(1-\theta_0)\,t^{*\frac{\theta-\theta_0}{1-\theta}}\right]$$

em que t^* é o tempo relativo t/T
Como se pode verificar para $t=0 \longrightarrow t^*=0$ vem $N=M$ para $t=T \longrightarrow t^*=1$ vem $N=M\,[1-(1-\theta_0)]=M\theta_0=m$ $\int_0^T N dt = MT\theta$ portanto o factor de carga é o mesmo.

Calculando dN/dt^* vem

$$-M\,\frac{(\theta-\theta_0)}{1-\theta}\,(1-\theta_0)\,t^{*\frac{2\theta-\theta_0-1}{1-\theta}} < 0,$$

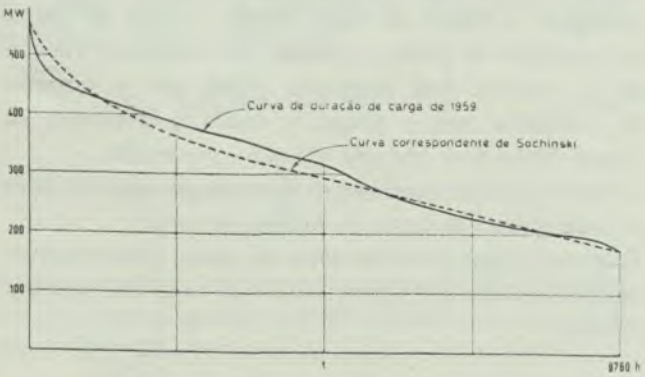
o que mostra que a curva é sempre decrescente.
Calculando d^2N/dt^{*2} vem

$$-M\,\frac{(\theta-\theta_0)\,(1-\theta_0)}{(1-\theta)}\,t^{*\frac{3\theta-\theta_0-2}{1-\theta}} \times \frac{2\theta-\theta_0-1}{1-\theta},$$

portanto, a curva tem sempre a mesma concavidade, positiva se $2\theta<\theta_0+1$ e negativa se $2\theta>\theta_0+1$. Para $2\theta=\theta_0+1$ a curva transforma-se na recta $N=M\,[1-(1-\theta_0)\,t]$.
Recomenda-se a relação $\theta_0=\theta^{2,1}$ a $\theta_0=\theta^{2,5}$ se θ_0 não for conhecido a partir de dados estatísticos.
Vejamos o que se passa com a nossa rede relativamente ao diagrama de 1959.
Tem-se $\theta_0=0{,}325$, $\theta=0{,}576$, $M=554$ MW, m = 180 MW.
A função de Soschinski correspondente é:

$$N = 554\,[1-0{,}675\,t^{*0{,}53}]$$

Apresenta-se a seguir a representação gráfica desta função.



2. — Bombagem. Teoria e aplicações.

2.1 — Aspectos teóricos.

Seja dada a curva de duração de carga dum sistema e consideremos sómente dois meios de produção para satisfação dessa carga: uma central base fornecendo uma potência N_b durante todo o período T; uma central de ponta de arma-

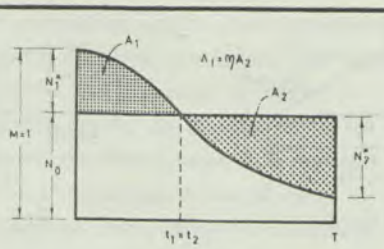


Fig. 11

zenamento por bombagem que fornece toda a potência acima de N_b. A água é armazenada à custa da central base, aproveitando os vazios. do diagrama (fig. 11).
Supondo a curva de duração aproximada pela curva de Soschinski, tira-se fàcilmente o valor de t que corresponde a uma certa potência N. Com efeito vem

$$t^*=\left[\frac{M-N}{M\,(1-\theta_0)}\right]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}} \text{ e para } N=N_b \text{ vem } t^*=\left[\frac{M-N_b}{M\,(1-\theta_0)}\right]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}}$$

A área A_1 é igual a $\int_0^{t_1}(N-N_b)dt=-N_b\,t_1+\int_0^{t_1}N dt=-N_b\,t_1+$

$$+\int_0^{t_1}M\left[1-(1-\theta_0)\left(\frac{t}{T}\right)^{\frac{\theta-\theta_0}{1-\theta}}\right]dt=-N_b\,t_1+Mt_1-$$

$$-(1-\theta_0)\,M\left(\frac{t_1}{T}\right)^{\frac{1-\theta_0}{1-\theta}}\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\times T=N_1{}^*t_1-$$

$$-(1-\theta)\,M\left(\frac{t_1}{T}\right)^{\frac{1-\theta_0}{1-\theta}}\times T;$$

como

$$t_1=T\left[\frac{N_1{}^*}{M\,(1-\theta_0)}\right]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}} \qquad (5)$$

vem por substituição

$$A_1=N_1{}^*T\left[\frac{N_1{}^*}{M\,(1-\theta_0)}\right]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}}-(1-\theta)M\left[\frac{N_1{}^*}{M\,(1-\theta_0)}\right]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}\times\frac{1-\theta_0}{1-\theta}}T=$$

$$=T\,\frac{N_1{}^{*\frac{1-\theta_0}{\theta-\theta_0}}}{[M\,(1-\theta_0)]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}}}-(1-\theta)\,\frac{N_1{}^{*\frac{1-\theta_0}{\theta-\theta_0}}}{M^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}}(1-\theta_0)^{\frac{1-\theta_0}{\theta-\theta_0}}}T=$$

$$=T\,(\theta-\theta_0)\,M^{-\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}}\left[\frac{N_1{}^*}{1-\theta_0}\right]^{\frac{1-\theta_0}{\theta-\theta_0}} \quad \text{e com } T=1$$

$$A_1=(\theta-\theta_0)\,M^{-\frac{1-\theta}{\theta-\theta_0}}\left[\frac{N_1{}^*}{1-\theta_0}\right]^{\frac{1-\theta_0}{\theta-\theta_0}} \qquad (6)$$

donde se tira

$$N_1{}^*=(1-\theta_0)\left(\frac{A_1}{\theta-\theta_0}\right)^{\frac{\theta-\theta_0}{1-\theta_0}}M^{\frac{1-\theta}{1-\theta_0}} \qquad (7)$$

A área A_2 é igual a

$$\int_{t_2}^{T}(N_b-N)\,dt=N_O\,(T-t_2)-\int_{t_2}^{T}M\left[1-(1-\theta_O)\,\frac{t}{T}^{\frac{\theta-\theta_o}{1-\theta}}\right]dt=$$

$$=N_b\,(T-t_2)-M\,(T-t_2)+(1-\theta)\,M\left[1-\left(\frac{t_2}{T}\right)^{\frac{1-\theta_o}{1-\theta}}\right]T$$

com $T=1$ vem

$$A_2=N_b\,(1-t_2)-M\,(1-t_2)+(1-\theta)\,M-(1-\theta)\,Mt_2^{\frac{1-\theta_o}{1-\theta}}=$$

$$=-N_1^*\,(1-t_2)+(1-\theta)\,M-(1-\theta)\,Mt_2^{\frac{1-\theta_o}{1-\theta}}.$$

É claro que atendendo à figura e às hipóteses feitas, será $t_1=t_2$ e $A_1=\eta A_2$ sendo η o rendimento conjunto das bombas, turbinas, linhas, isto é o rendimento conjunto do ciclo de bombagem.

Teremos assim

$$(\theta-\theta_O)\,M^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_o}}\left[\frac{N_1^*}{1-\theta_O}\right]^{\frac{1-\theta_o}{\theta-\theta_o}}=\eta\left[-N_1^*\left(1-\left[\frac{N_1^*}{M(1-\theta_O)}\right]^{\frac{1-\theta}{\theta-\theta_o}}\right)+\right.$$

$$\left.+(1-\theta)\,M-(1-\theta)\,M\left[\frac{N_1^*}{M(1-\theta_O)}\right]^{\frac{1-\theta_o}{\theta-\theta_o}}\right]$$

equação que permite (teòricamente) determinar o valor de N_1^*, a partir do qual fica conhecido o valor de N_2^*.

Na prática, procede-se da seguinte forma:

Arbitra-se um valor para t_2 após o que se calcula A_2; de $A_1=A_2\eta$ e por aplicação de (7) tira-se N_1^* e por aplicação de (5) o valor de t_1. Se $t_1=t_2$ o valor arbitrado é correcto, caso contrário tem que se tentar novamente... Determinado o valor de $t_2=t_1$ correcto, obtêm-se N_1^* e N_2^* potências respeitantes às turbinas e às bombas.

Apresentam-se a seguir resultados de cálculos efectuados para curvas de duração com $\theta=0{,}55$, $\theta=0{,}65$, e $\theta=0{,}75$, com $\theta_O=\theta^2$:

θ	θ_o	$t_1=t_2$	A_1	A_2	N_1^*	θ_1^*
0,75	0,55	0,445	0,043	0,062	0,235	0,183
0,65	0,42	0,42	0,055	0,079	0,33	0,167
0,55	0,303	0,40	0,0605	0,0865	0,42	0,128

N_b	N_2^*	ΔN	Capacidade de armazenamento em m³ para H=100 m e H=300 m	
0,765	0,215	0,015	448 000	149 000
0,67	0,265	0,020	550 000	183 000
0,58	0,224	0,030	630 000	260 000

Para o cálculo do volume de armazenamento considerou-se um valor de $M=100$MW e $T=24$h.

Esse volume foi calculado pela fórmula

$$V=\frac{270\,t_T}{n_t\,H}\,N_1^*\,\frac{1}{0{,}736}$$

N_1^* em (kW)
V em (m³)
H em (m)
t_T o tempo de funcionamento a plena carga das turbinas, em horas

Com efeito o volume V de armazenamento em metros cúbicos é dado pela expressão $V=Q\times 3600\,t_T$ sendo Q o caudal de descarga em metros cúbicos por segundo. Por outro lado, como a potência N é dada pela fórmula $N=1000\,\eta_t\,QH/75$ (em cavalos vapor), estando Q expresso em metros cúbicos por segundo e H em metros. A substituição de Q tirado desta expressão na expressão anterior de V dá

$$V=\frac{75\,N}{1000\,\eta_t\,H}\times 3600\,t_T=\frac{270\,N\,t_T}{\eta_t\,H}$$

e se N é expresso em quilowatts em vez de estar em cavalos vapor resulta

$$V=\frac{270\,N\,t_T}{\eta_t\,H}\,\frac{1}{0{,}736}$$

O tempo t_T que figura na expressão de V é dado pela relação $t_T=A_1/N_1^*=\theta_1^*\,T$. O rendimento η_t foi considerado 0,85.

Observações:

1) Haverá por vezes vantagem em utilizar curvas de concentração na resolução do problema anterior. Como se sabe, a curva de concentração é obtida a partir da curva de duração fazendo corresponder a cada potência P a energia E (área da curva de duração) limitada pela ordenada de $P\left(\int_O^P tdP\right)$. Obtém-se assim uma dependência P-$E(P)$ sendo $E(P)$ a energia total fornecida a potências inferiores ou iguais a P.

Logo se vê que as curvas de concentração podem ser úteis na resolução do problema anterior. Com efeito, consideremos uma curva de duração (figs. *a* e *b*) e a respectiva curva de concentração. O que se pretende é determinar uma ordenada N tal que A_1 seja igual a $\eta\,A_2$. Prolonguemos o segmento *oa* (fig. *c*) e consideremos a intersecção do prolongamento com a horizontal N. É evidente que o segmento *bc* representa precisamente a energia E_2 correspondente à área A_2 enquanto o segmento *bd* representa a energia E_1 correspondente à área A_1. Se se pretende $A_1=\eta A_2$ terá de ser $bc=bd/\eta$. Ora, considerando mais horizontais teremos segmentos $b_1\,d_1$, $b_2\,d_2$, ... a partir dos quais podem ser marcados os pontos $c_1\,c_2$, ... obedecendo à condição de ser $b_i\,c_i=b_i\,d_i/\eta$, pontos que definem uma curva passando

por e. A intersecção desta curva com o prolongamento do segmento OA definir-nos-á o ponto c cuja ordenada dá precisamente a potência N procurada.

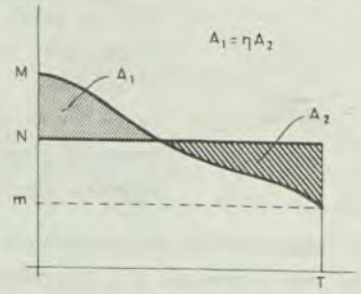


Fig. a

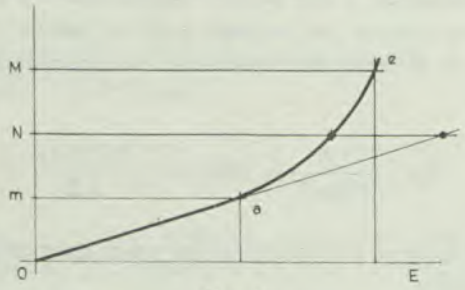


Fig. b

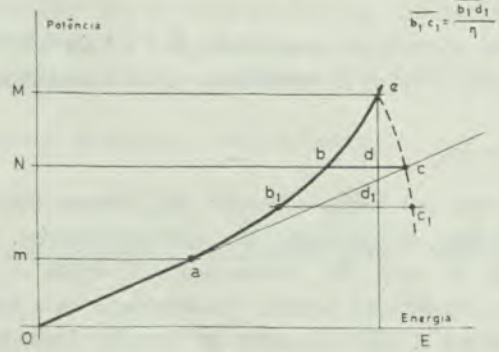


Fig. c

2) Pode, às vezes, ter interesse para ponto de partida para a solução definitiva, conhecer o valor de N_b embora aproximado:

Fazendo $M = 1$ e $T = 1$ tem-se de $MT\theta = N_1^* \theta_1^* T + N_b \theta_1 T$, em valores relativos.

$$\theta = N_1^* \theta_1^* + N_b \theta_1 \text{ com } \theta_1^* = \frac{A_1}{N_1^*} \text{ e } N_b \theta_1 = N_b - A_2$$

Por substituição, temos

$\theta = A_1 + N_b - A_2$ donde $N_b = \theta + A_2(1 - \eta)$ donde se conclui $N_b \simeq \theta$ isto é que θ é uma boa aproximação para N_b quando A_2 é pequeno. Este resultado era de esperar dado que sendo A_2 pequeno, a diferença entre A_2 e A_1 é pequena correspondendo então N_b à ordenada média da curva de duração.

Tratou-se do caso em que a central base trabalhava com um factor de carga igual a 1; generalizemos agora para o caso de essa central trabalhar com um factor de carga menor que 1. Supõe-se portanto que a potência da central base varia com o tempo. A lei dessa variação reflectida na curva de duração pode ser representada por uma lei matemática uma vez conhecida a variação real.

Seguindo a hipótese de JAEGER para um tratamento analítico mais fácil, tomamos essa variação sinusoidal. (Em certos casos poderá ter interesse, considerar uma variação linear ou parabólica).

Como se disse, consideremos uma variação sinusoidal. Teremos assim: $N' = \overline{N}_b + \frac{\Delta N_b}{2} \cos \frac{\pi t}{T}$ em que $\overline{N}_b$ é a ordenada média da curva e ΔN_b a amplitude de variação das

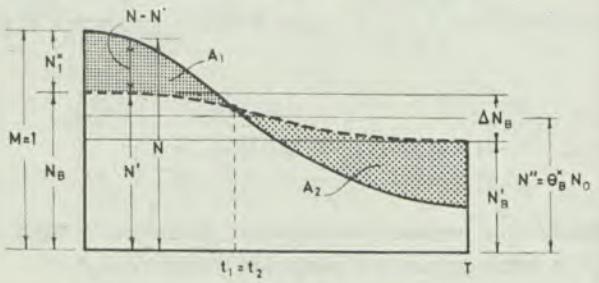


Fig. 12

potências. (fig. 12). Sendo os valores extremos das potências na curva de duração da central base, N_O e N'_O é evidente que será $N' = (N_b + N'_b)/2 + (N_b - N'_b)/2 \cos \pi t/T$.

O factor de carga θ_B^* da central base será:

$$\frac{\int_0^T N' dt}{N_b T} = \frac{N_b + N'_b}{2 N_b} = \frac{\overline{N}_b}{N_b} = 1 - \frac{\Delta N_b}{2 N_b}$$

A área limitada por N' é $\overline{N}_b T = \theta_B N_b T$ cuja diferença para a área $N_b T$ a considerar na hipótese de $\theta_B = 1$ é $(1 - \theta_B) N_b T$.

O ponto de intersecção da curva de duração (suposta assimilada a uma curva de Soschinski) corresponde a t_1 dado por

$$M\left[1 - (1 - \theta_O)\, t_1^{*\frac{\theta - \theta_o}{1 - \theta}}\right] = \overline{N}_b + \frac{\Delta N_b}{2} \cos \pi t_1^* = \theta_B \left[N_b + \frac{\Delta N_b}{2} \cos \pi t_1^*\right] \quad (8)$$

Calculemos agora a área A_1. Vem

$$A_1 = \int_0^{t_1} (N - N')\, dt = M \int_0^{t_1} \left[1 - (1-\theta_O) \left(\frac{t}{T} \right)^{\frac{\theta-\theta_o}{1-\theta}} \right] dt - \int_0^{t_1} \left(\overline{N}_b + \frac{\Delta N_b}{2} \cos \frac{\pi t}{T} \right) dt$$

e para $M=1$, $T=1$ vem

$$A_1 = \underbrace{(1-\overline{N}_b)\, t_1 - (1-\theta)\, t_1^{\frac{1-\theta_o}{1-\theta}}}_{A_1'} - \frac{\Delta N_b}{2\pi} \operatorname{sen} \pi t_1 \qquad (9)$$

Da mesma forma tira-se para

$$A_2 = \int_{t_2}^{T} (N' - N)\, dt = (1-t_2)(\overline{N}_b - 1) - \frac{\Delta N_b}{2\pi} \operatorname{sen} \pi t_2 + (1-\theta_O) \left[1 - t_2^{\frac{1-\theta_o}{1-\theta}} \right]$$

$$A_2 = \underbrace{(1-\theta_O) \left[1 - t_2^{\frac{1-\theta_o}{1-\theta}} \right] - (1-\overline{N}_b)(1-t_2)}_{A_2'} - \frac{\Delta N_b}{2\pi} \operatorname{sen} \pi t_2 = A_2' - \frac{\Delta N_O}{2\pi} \operatorname{sen} \pi t_2 \qquad (10)$$

O significado geométrico das áreas A_1' e A_2' é evidente. Terá de ser agora $A_1 = \eta A_2$ e $t_1 = t_2$ $\therefore$ $A_1' - \Delta N_b/2 \operatorname{sen} \pi t_1 = \eta (A_2' - \Delta N_b/2 \operatorname{sen} \pi t_1)$ $\therefore$

$$A_1' - \eta A_2' = \frac{\Delta N_b}{2} (1-\eta) \operatorname{sen} \pi t_1 \qquad (11)$$

A partir das fórmulas (8), (9) e (10) e (11) calculam-se t_1, $\overline{N}_b'$, ΔN_b, θ_B, etc.

Nos casos práticos θ e θ_B são conhecidos; parte-se dum valor aproximado para N_b tirando-se $\overline{N}_b = \theta_B N_b$ donde se obtém $\Delta N_b = 2\,(N_b - \overline{N}_b')$.

Conhecidos $\overline{N}_b$ e ΔN_b, determina-se o ponto de intersecção $t_1 = t_2$ calculando-se em seguida A_1 e A_2 e ensaia-se a verificação da igualdade $A_1 = \eta A_2$. Sucessivas correcções no valor inicial de N_b conduzem ao seu valor definitivo.

Como são conhecidos θ e θ_B há a possibilidade de se conseguir uma boa aproximação para o valor inicial de N_b.

Com efeito de $\theta = \frac{N_1^*}{M} \theta_P + \frac{N_b}{M} \theta_B^*$ (4), tem-se, atendendo a que

$$\theta_P = \frac{A_1}{N_1^*\, T} \quad \text{e} \quad \theta_B^* = \theta_B - \frac{A_2}{N_b T} \quad \text{e com } M=1 \text{ e } T=1$$

$$\theta = A_1 + N_b \theta_B - A_2 = \theta_B N_b - A_2 (1-\eta) \therefore N_b = \frac{\theta + A_2(1-\eta)}{\theta_B}$$

fórmula que dá uma boa aproximação para N_b.

Aplicação:

Com um factor de carga de 0,75 para um sistema, de 0,82 para a central base e utilizando as fórmulas anteriores obteve-se

$$N_b = 0{,}915 \quad A_1 = 0{,}055 \quad A_2 = 0{,}079 \quad N_1^* = 0{,}085$$

Comparar estes valores $N_b = 0{,}915$ e $N_1^* = 0{,}085$ com os valores 0,765 e 0,235 obtidos quando se tinha considerado o factor de carga da central base igual a *1*.

Rendimento dos esquemas de bombagem

Nos cálculos anteriores tomou-se um rendimento $\eta = 0{,}7$. Convém fazer algumas observações a esse respeito.

Nas modernas instalações o rendimento mecânico das turbinas e das bombas é superior.

Na central de Reisach, por exemplo, o rendimento η é 0,715 incluindo já um coeficiente de perdas de carga (na bombagem e produção) e entrando com o rendimento de 0,995 deduzido o consumo relativo à alimentação da central de produção.

É preciso entrar com as perdas devidas ao transporte de energia da central de base à central de bombagem, bem como desta ao consumidor, o que pode fazer diminuir o rendimento.

Como é de prever, o valor de η influi consideràvelmente na economia da solução bombagem; assim, dá-se a seguir um método aproximado para medir a influência de η.

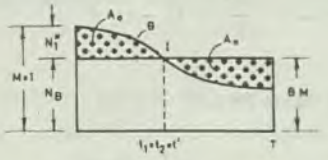


Fig. 13

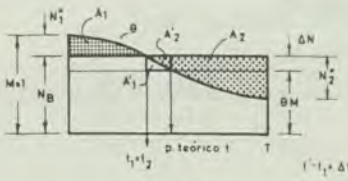


Fig. 14

Na fig. 13 está representado o caso ideal em que $\eta = 1$. Na fig. 14 está representado um caso real com $\eta < 1$. Uma vez que $A_1 = \eta A_2$ $(A_1 < A_2)$ haverá um deslocamento do ponto $t_1 = t_2$ para a esquerda da posição teórica da fig. 13.

(4) θ_B^* é o factor de carga correspondente à utilização de potência N_b na hipótese anterior mas sem bombagem

o que corresponde a um aumento ΔN(5) da potência N_B, da potência das bombas N_2*, e diminuição ΔN da potência N_1* das turbinas.

Das figs. 13 e 14 tira-se que $A_1 = A_0 - \Delta N t_1 - A_1'$ e que $A_2 = A_0 + \Delta N(T - t_1) - A_1'$, portanto, será $A_2 - A_1 = \Delta N T = \Delta A$. Virá então $N_0 = \theta M + \Delta N$ e $N_1^* = M - \theta M - \Delta N$ e $N_2^* = \theta M - \theta_0 M + \Delta N$.

Com $M = 1$ resulta em potências relativas

$N_0 = \theta + \Delta N$	$N_1^* = 1 - \theta - \Delta N$	$N_2^* = \theta - \theta_0 + \Delta N$
(12)	(13)	(14)

Quando $\eta_1 < 1$ há, portanto, uma perda de energia $\Delta A = A_2 - A_1 = (1 - \eta_1) A_2$ e uma perda de potência $\Delta N = \Delta A / T = (1 - \eta_1) A_2 / T$. Fala-se aqui de perda de potência produtível em relação ao caso ideal de rendimento igual à unidade.

Se $A_2 = A_0 + \Delta N (T - t_1) - A_1'$ vem $A_2 = A_0 + \Delta N [T - (t' - \Delta t)] - (\Delta t / 2)\ \Delta N = A_0 + \Delta N (T - t' + \Delta t / 2)$ e desprezando $\Delta t / 2$, $A_2 = A_0 + \Delta N (T - t')$.

Resulta então

$$\Delta N = \frac{(1 - \eta_1)[A_0 + \Delta N (T - t')]}{T} \quad \therefore \quad \Delta N = (1 - \eta_1) \frac{A_0}{T} + \frac{(1 - \eta_1)(T - t')\,\Delta N}{T}$$

e mais rigorosamente

$$\Delta N = (1 - \eta_1) \frac{A_0}{T} + (1 - \eta_1) \frac{(T - t' + \Delta t)\,\Delta N}{T}$$

donde se tira o valor de ΔN

$$\Delta N = \frac{(1 - \eta_1) A_0}{\eta_1 T + (1 - \eta_1) t' - (1 - \eta_1) \Delta t}$$

ou aproximadamente

$$\Delta N = \frac{(1 - \eta_1) A_0}{\eta_1 T + (1 - \eta_1) t'} \qquad (15)$$

Como $\frac{dN}{dt} \simeq \frac{\Delta N}{\Delta t}$, vem

$$\Delta t \simeq \frac{\Delta N}{\left(\frac{dN}{dt}\right)_{t'}} \qquad (16)$$

e, portanto, conhecidos A_0 e t' a partir da curva de duração (ou da sua aproximação funcional) ficam conhecidos ΔN e Δt em primeira aproximação.

Observações:

1) A_0 e t' podem ser determinados gráfica ou analìticamente a partir da curva de duração .

Bastará em qualquer dos casos calcular o valor médio da potência $N \longrightarrow \frac{1}{T} \int^{*} N dt = \theta M$. O ponto de intersecção da curva N com a recta $N = \theta M$ define o ponto t'. Conhecido t' tem-se $A_0 = \int_0^{t'} (N - \theta M)\, dt$.

2) Procedimento análogo mas com a condição $A_1 = \eta A_2$, leva à determinação de ΔN e Δt. As fórmulas (15) e (16) serão muito úteis se a determinação for gráfica para darem uma primeira aproximação.

3) As fórmulas (15) e (16) serão tanto mais precisas quanto menor for Δt (η elevado) e quanto menor for a diferença do coeficiente angular da curva aproximada para o da curva real na vizinhança de t', sendo necessário também que dN/dt varie muito lentamente na vizinhança t' o que obriga a que $d^2N/dt^2 \simeq 0$ nessa vizinhança.

Indica-se a seguir um processo mais rápido mas menos rigoroso:

Consideremos para a mesma curva de duração duas hipóteses de bombagem com rendimentos diferentes η_1 e η_2; será $\Delta N_1 = \frac{1 - \eta_1}{T} A_{21}$ (A_{21} é o A_2 da hipótese 1) e $\Delta N_2 = \frac{1 - \eta_2}{T} A_{22}$. Tomando em primeira aproximação $A_{21} = A_{22} = A_2$ vem

$$\Delta N_2 - \Delta N_1 \simeq \frac{\eta_1 - \eta_2}{T} A_2 \qquad (17)$$

Esta fórmula permite calcular a variação da potência produtível na ponta quando se passa do rendimento η_1 para um rendimento η_2(6). Entrando com o valor ΔN_1 na expressão $\Delta N_1 = 1 - \frac{\eta_1}{T} A_{21}$ tira-se um novo valor para $A_{21} = A_2$ que introduzido em (17) dá um valor mais aproximado de ΔN_2 e assim sucessivamente.

Exemplo:

Suponhamos que $\theta = 0{,}65$, $\theta_0 = 0{,}42$, $A_2 = 0{,}0785$; vem para N_1* o valor 0,33 e para ΔN_1 o valor 0,020 se $\eta_1 = 0{,}7$.

Para $\eta_2 = 0{,}6$ virá $\Delta N_2 = 0{,}020 + (0{,}7 - 0{,}6)/T \times 0{,}0785 = 0{,}028$. A perda de energia adicional será $\Delta\,(\Delta A) = (\Delta N_2 - \Delta N_1)\, T = 0{,}0079 = 0{,}008$ da energia total gerada suposta 1 ($M = 1$, $T = 1$. Como a energia total gerada é $MT\theta = 0{,}65$ a perda será $0{,}008/0{,}65 = 1{,}22\%$.

---

(5) Este valor de ΔN é o que figura no quadro da página 61.

(6) Suponhamos calculado um valor aproximado ΔN_1, ao qual corresponde um valor η_1 próximo de η_2. Entrando com o valor de ΔN_1, de η_1, e η_2 tira-se ΔN_2.

Os novos valores serão $N_{BO}=\theta+\Delta N_2=0{,}65+0{,}028=0{,}678$ $N_1{}^*=1-N_{BO}=0{,}322$ $A_2=0{,}0785+0{,}0079=0{,}0864$ $A_1=$ $=0{,}6\times 0{,}0864=0{,}05214$.

Efeito do intervalo de tempo que decorre na passagem de bombagem à produção e vice-versa.

É claro que não é possível passar instantâneamente da operação de bombagem para a de turbinamento tal como se supôs no estudo que tem sido feito até aqui. Haverá um certo atraso Δt_1 referente ao turbinamento e um atraso Δt_2 referente à bombagem, em relação ao instante $t_1=t_2$ (fig. 15). A existência deste atraso $\Delta t_1+\Delta t_2=\Delta t$ entre as duas operações corresponde a uma perda de potência $\Delta N\simeq(dN/dt)_{t_1}\,\Delta t$ e a uma perda de energia produtível $\Delta N\times T$, em relação ao caso em que $\Delta t_1=\Delta t_2=0$, que se vai reflectir no aumento da potência de base, no aumento da capacidade de armazenamento e no aumento da potência das turbinas para encurtar o intervalo de tempo Δt_1.

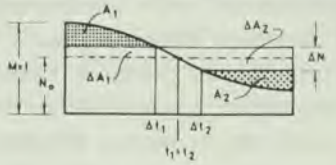


Fig. 15

Mais detalhadamente: alguma energia suplementar ΔA_1 tem de ser produzida pela central base, mas em compensação deixa de se gastar uma energia $\Delta A_1/\eta$ na bombagem. A economia resultante em energia de base é $(1/\eta-1)\,\Delta A_1$ em que ΔA_1 pode ser calculado pela fórmula:

$$\Delta A_1=\left(\frac{dN}{dt}\right)_{t_1}\times\Delta t_1\left[t_1-\Delta t_1+\frac{\Delta t_1}{2}\right]=\left(\frac{dN}{dt}\right)_{t_1}\Delta t_1\left[t_1-\frac{\Delta t_1}{2}\right]$$

e desprezando $\Delta t_1/2$, vem $\Delta A_1=(dN/dt)_{t_1}\,\Delta t_1\times t_1$.

A potência da central base terá de ser aumentada de $\Delta N=$ $=(dN/dt)\,\Delta t_1$. Por outro lado para diminuir ao mínimo o tempo Δt_1 e consequentemente a perda de potência será necessário aumentar a potência das turbinas para que elas possam fornecer a potência necessária antes de atingirem a plena carga o que obrigará a aumentar o volume de armazenamento.

Como se disse atrás do facto de haver o desfasamento entre as operações de turbinamento e bombagem resulta uma economia da energia base igual a $(1/\eta-1)\,\Delta A_1$.

Na maior parte dos casos o valor capitalizado dessa energia economizada $(1/\eta-1)\,\Delta A_1$ é menor que o custo da potência adicional na central base (caso de centrais térmicas e nucleares) que é 1,8 a 2 vezes mais cara que a potência de bombagem, no caso de centrais térmicas a carvão e 3 vezes mais no caso de centrais nucleares.

Nota-se também que tratando-se de centrais térmicas estas têm de estar prestes a funcionar na altura devida o que corresponde à central trabalhar mais meia hora a plena potência (Comissão Eléctrica Europeia, relat. E-P/47 pág. 17, Edição Francesa) o que equivale a $N_O\times 1/2$ kWh com N em quilowatts, por dia.

Mencionamos a seguir alguns valores que dão as ordens de grandeza dos intervalos de tempo a que acabamos de nos referir.

Tempo para levar uma turbina parada até à sua carga nominal	130 s
Tempo para levar uma bomba parada até à sua carga nominal	180 s
Passagem da produção máxima à potência nominal de bombagem	70 s
Passagem da bombagem nominal à produção nominal	60 s

Como se vê nenhuma central de ponta de origem térmica (a vapor) pode realizar os tempos indicados.

(Continua)

JOSÉ MARIA DE QUADROS E COSTA

Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.)

SERVIÇOS DE ENERGIA DA COMPANHIA NACIONAL DE ELECTRICIDADE