

Introdução à Coordenação Hidrotérmica

Prof. Antonio Simões Costa

Universidade Federal de Santa Catarina

Planejamento da Operação Hidrotérmica (I)

- Visa determinar as participações das gerações de origem hidráulica e de origem térmica no atendimento da demanda;
- Problema complexo porque depende do grau de dificuldade em se prever as afluições naturais aos reservatórios, do maior ou menor grau de armazenamento de água nos mesmos, etc.;
- Participação térmica determinada de modo a propiciar o uso mais racional possível da água dentro do contexto de incertezas quanto às afluições futuras;

Planejamento da Operação Hidrotérmica (II)

- Busca-se minimizar:
 - por um lado o risco de déficit de geração de energia;
 - por outro, o desperdício de energia hidráulica implicado por vertimento de volumes de água turbináveis.
- Problema em geral abordado em horizontes de tempo distintos;
- Em um dado horizonte de tempo, as metas a serem cumpridas no horizonte de menor prazo que o segue são estabelecidas;
- Quanto maior o horizonte de planejamento, tanto menos detalhada e mais incerta é a programação.

Horizontes usuais de planejamento da operação

- *Programação de longo prazo*: horizonte de 5 anos com discretização mensal para determinar as participações de geração hidráulica e térmica e intercâmbios de energia. Reservatórios agregados em reservatório equivalente;
- *Programação de Médio Prazo*: horizonte de 1 ano com discretização semanal. Utiliza métodos de previsão de vazões para determinar as participações térmica e hidráulica no atendimento da demanda;
- *Programação de curto prazo*: horizonte semanal com discretização horária. Abordagem é determinística, aspectos energéticos, hidráulicos e elétricos simultaneamente considerados (a rede elétrica, intercâmbios e características das unidades hidráulicas representados).

- *Métodos empíricos* - Baseiam-se na história passada, prevendo situações semelhantes;
- *Métodos baseados em simulação* - Aperfeiçoamentos dos métodos empíricos, usando modelos matemáticos que permitem analisar grande número de casos, dos quais se deduz uma solução (não necessariamente a ótima global);
- *Métodos precisos* - Resolvem o problema formulado por uma técnica de otimização, como programação dinâmica estocástica, necessitando portanto de modelos matemáticos mais ou menos sofisticados.

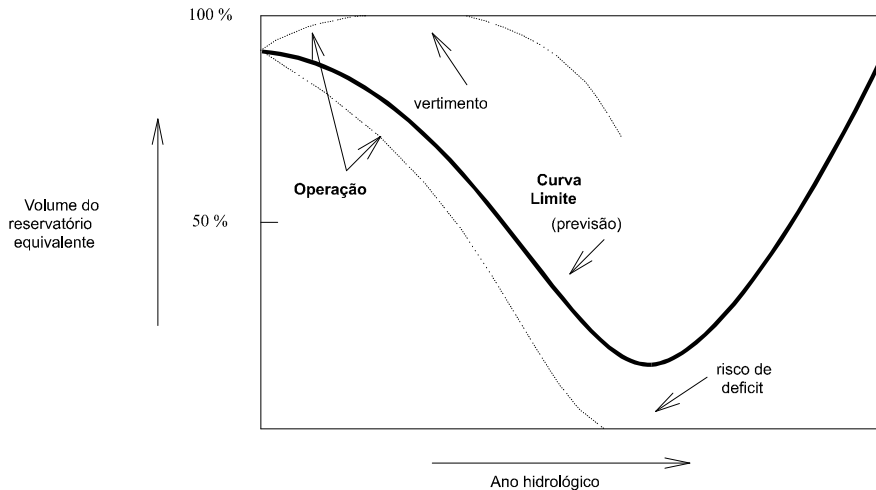
Estratégia Baseada na Curva-Limite (I)

- Estratégia determinística de médio prazo tradicional, que busca chegar ao fim do período de planejamento sem ocorrências de déficit;
- Curva-limite indica o nível de armazenamento do sistema abaixo do qual as térmicas devem ser acionadas para garantir o atendimento da demanda;
- Curva é levantada com base no histórico das vazões registradas no passado.

Estratégia Baseada na Curva-Limite (II)

- Durante a operação ao longo do ano hidrológico, procura-se acompanhar a curva-limite:
 - reduzindo-se a participação térmica, se o nível do reservatório equivalente está acima da curva-limite, ou
 - aumentando-a, se o nível do reservatório está abaixo da curva-limite.
- Procura-se evitar vertimento (desperdício) de água e o risco de déficit de suprimento que resultaria da exaustão do volume útil armazenado;
- Método é um compromisso entre operação econômica e segurança;
- Conduz a expectativa elevada de atendimento, mas custos de geração térmica fora dos períodos secos tendem a ser elevados.

Exemplo de Curva-Limite



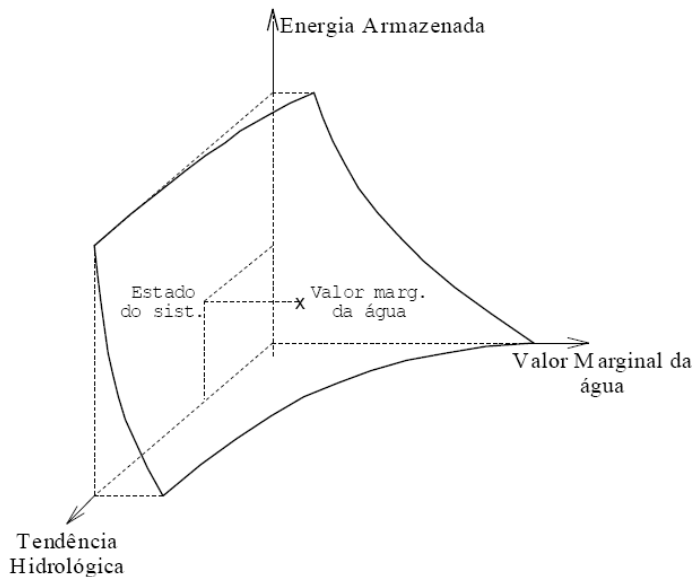
Estratégia baseada no valor marginal da água

- Visa minimizar o custo total de atendimento da demanda, que inclui o custo da geração térmica mais o custo do déficit;
- Busca-se portanto operar com a geração térmica mínima nos períodos hidrológicamente favoráveis, e elevando-a nos períodos hidrológicamente adversos;
- Para operacionalizar esta estratégia, é necessário definir o *valor marginal da água*.

Custo Marginal da Água

- Definido como a *derivada do custo esperado atualizado da geração térmica e da energia não suprida em relação à produção da energia hidráulica ao longo de um período*;
- Representa o acréscimo de custo decorrente da utilização de *uma unidade de energia armazenada* ao longo do período;
- Está associado a cada estado do sistema, caracterizado por um nível de armazenamento e pela tendência hidrológica;
- Tende a crescer com a diminuição da energia armazenada e com a redução do valor da variável que representa a tendência hidrológica (isto é, quando a expectativa de aflúências é mais pessimista que o valor corrente).

Valor Marg. Água x Tend. Hidrológica x Nível Armazen.



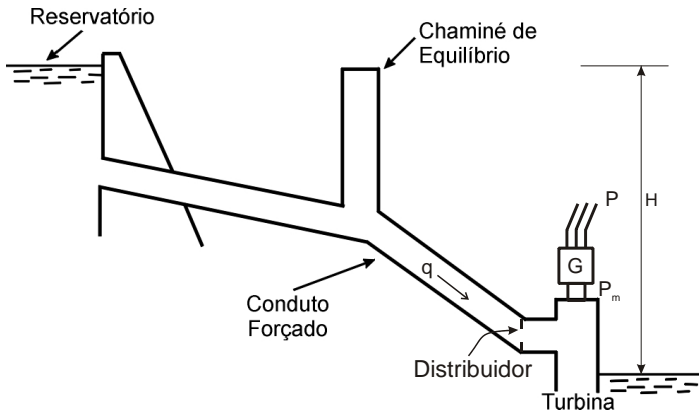
Características de Unidades Hidrelétricas (I)

Componentes

- *Turbina Hidráulica*: aproveita a energia da água armazenada em um reservatório, cujo nível d'água é elevado com respeito à turbina.
- *Conduto forçado*: conduz a água do reservatório até a turbina;
- *Tubo de sucção*: permite a descarga da água à saída da turbina.
- Tipos mais utilizados de turbinas hidráulicas:
 - *Pelton*, ou de impulso;
 - *Francis*, ou de reação;
 - *Kaplan*, ou de hélice.

Características de Unidades Hidrelétricas (II)

Conduto forçado e chaminé de equilíbrio



- Condutos forçados longos: necessidade de *chaminé de equilíbrio*, para absorver ondas de pressão;
- Golpe de aríete: onda de pressão no conduto forçado resultante da ação do distribuidor em resposta a grandes variações de carga.

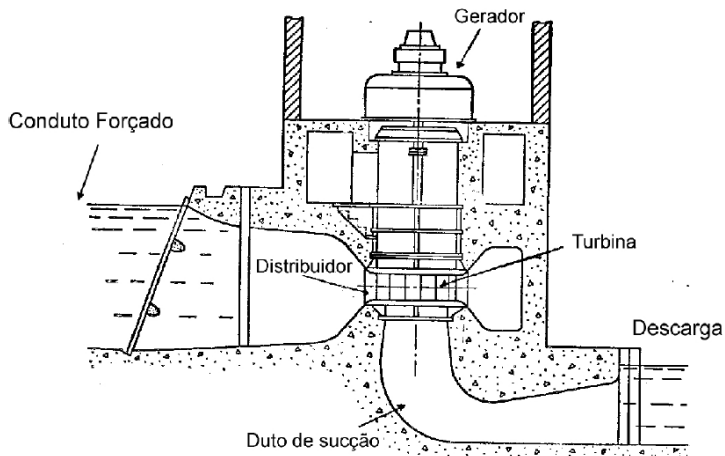
Características de Unidades Hidrelétricas (III)

Turbina Francis (I)

- Transfere tanto a energia de pressão quanto a energia cinética às pás do rotor;
- Componentes e características:
 - Caixa espiral;
 - Fluxo de água radial, para o interior da turbina;
 - Pressão da água sobre as pás móveis, em trajetória descendente;
 - Eixo normalmente vertical;
 - Alturas de queda de 10 m a 250 m.
 - Funções do *tubo de sucção*:
 - Permite que o rotor fique acima do nível da descarga;
 - Forma vácuo parcial, aumentando a eficiência da turbina.

Características de Unidades Hidrelétricas (IV)

Turbina Francis (II)



Características de Unidades Hidrelétricas (V)

Potência elétrica produzida

- Potência da água na saída do distribuidor:

$$P_{inj} = K H Q$$

- H : Altura do nível d'água (m);
- Q : Vazão (m^3/s);
- K : constante que depende das características físicas da água, da área do conduto forçado, etc.

- Potência mecânica da turbina:

$$P_m = K H Q \eta_t$$

onde η_t é o rendimento da turbina;

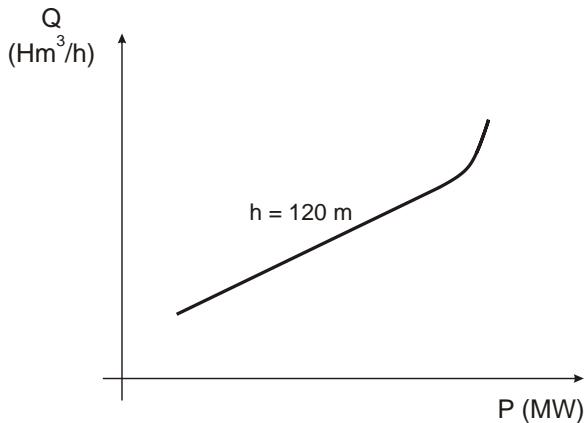
- Potência elétrica produzida:

$$P_e = K H Q \eta_t \eta_g$$

Características de Unidades Hidrelétricas (VI)

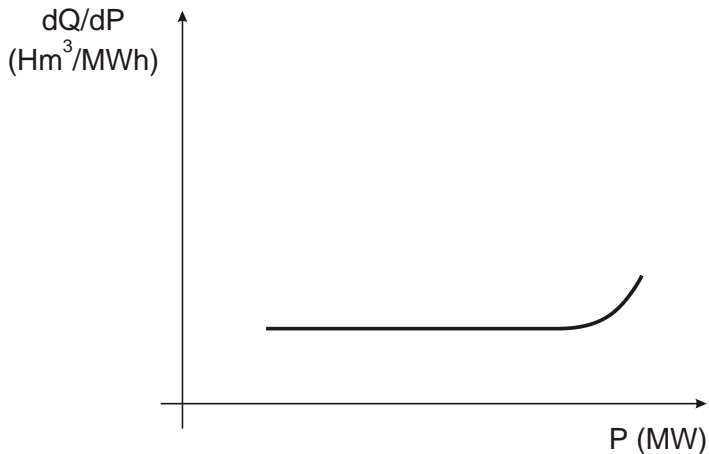
Característica Vazão \times Potência gerada para $H = \text{constante}$

- Curvas dependem da altura líquida de queda:



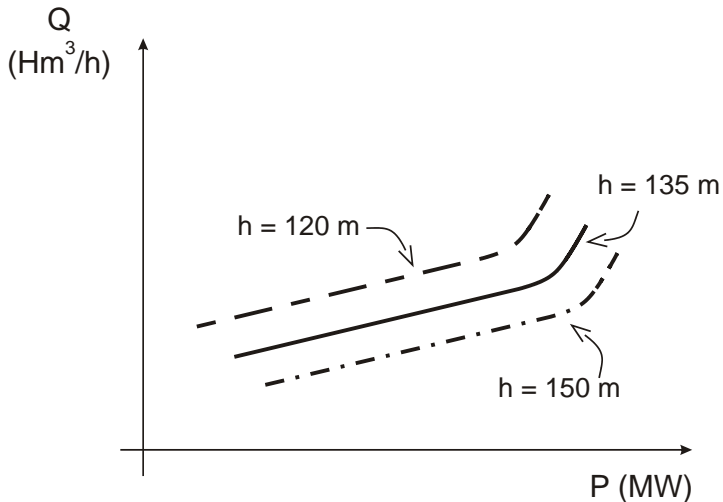
Características de Unidades Hidrelétricas (VII)

Curva de vazão incremental



Características de Unidades Hidrelétricas (VIII)

Varição da curva de vazão com H



- Programação com Restrição de Energia
- Programação Hidrotérmica de Curto Prazo

Programação com Restrição de Energia (I)

- Aplicável a sistemas hidrotérmicos com predominância de geração hidráulica;
- UHE tem capacidade suficiente para suprir demanda durante horizonte considerado:

$$\bar{P}_{H,j} \geq P_{L,j}, \quad j = 1, \dots, j_{\max}$$

- Porém energia disponível à UHE insuficiente para alimentar carga durante o horizonte de tempo:

$$\sum_{j=1}^{j_{\max}} P_{H,j} h_j \leq \sum_{j=1}^{j_{\max}} P_{L,j} h_j$$

- Necessidade da complementação térmica;
- Entretanto, *não se exige que a térmica funcione durante todo o horizonte de tempo T_{\max}* ;
- Objetivo: usar toda a energia hidráulica disponível para minimizar o custo de operação das térmicas.

- Térmicas devem operar durante todo o horizonte de tempo, pois capacidade das UHEs não é suficiente para atender carga;
- Volume d'água disponível para UHE deve ser utilizado para minimizar custo de operação das térmicas;
- Hipóteses:
 - altura de queda \approx constante;
 - ausência de vertimento;
- Caso sem perdas: potência da térmica constante durante horizonte considerado;
- Caso com perdas de transmissão: problema de otimização com restrições não-lineares, exigindo algoritmos especializados.