

CEPEL

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Projeto DECOMP

Nota Técnica Nº 1 / 2015

**Consideração do engolimento máximo das turbinas em
função da altura de queda na representação da vazão
turbinada máxima no modelo DECOMP**

Revisão 4

Abril/ 2015

1. INTRODUÇÃO

Esta Nota Técnica analisa o engolimento máximo considerado para as usinas hidroelétricas pelo modelo DECOMP [1] e descreve uma alteração realizada no seu cálculo, introduzida a partir da versão 21.9 do modelo, para contornar situações indesejáveis em que esse valor de turbinamento máximo era superior ao que se observava na prática.

2. ABORDAGEM UTILIZADA ATÉ A VERSÃO 21: ENGOLIMENTO MÁXIMO EM FUNÇÃO APENAS DA LIMITAÇÃO DO GERADOR

Até a versão 21 do modelo DECOMP, o turbinamento de uma usina hidroelétrica considerava exclusivamente as limitações dos geradores da usina, sendo dada pela expressão:

$$q_{maxG} = \frac{p_{inst}}{promed} , \quad (1)$$

onde:

p_{nom} : potência instalada total da usina, dada pela soma das potências nominais p_{nom} das unidades geradoras;

$promed$: produtividade média da usina, calculada utilizando uma altura média de montante, entre os volumes mínimo e máximo do reservatório, e uma cota média para o canal de fuga, fornecida no cadastro.

Portanto, esta vazão máxima consiste no valor de turbinamento associado à potência instalada máxima da usina e considerando uma altura de queda média.

Historicamente, esta forma de representação vinha se mostrando satisfatória, mesmo em situações onde a altura de queda da usina era inferior à altura efetiva de cadastro. No entanto, em casos onde a usina está com uma altura de queda muito inferior à altura efetiva, a expressão (1) leva a uma superestimativa no cálculo de turbinamento máximo em relação à prática, devido à curva de engolimento máximo da turbina.

Essa questão é ilustrada pela Figura 1, que mostra à esquerda e direita, respectivamente, o engolimento máximo da turbina e a potência máxima do gerador em função da altura de queda da usina. Ambos os valores são crescentes até o ponto em que se atinge a potência nominal (h_{nom}) do gerador, sendo a geração da usina nesse intervalo limitada pela capacidade da turbina. A limitação pelo gerador ocorre apenas acima desse valor h_{nom} , quando é necessário reduzir o turbinamento da unidade geradora, pois a geração que seria obtida com o engolimento máximo da turbina seria maior que a capacidade do gerador.

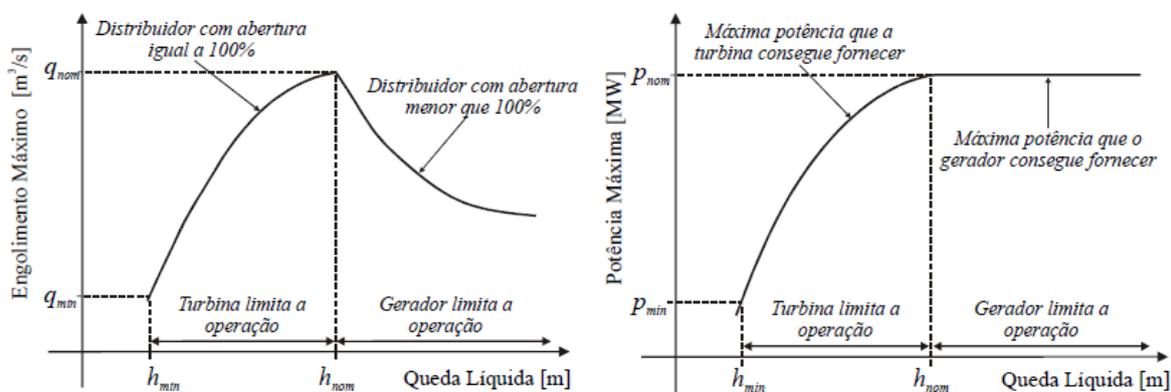


Figura 1 - Engolimento máximo e potência máxima de um conjunto turbina/gerador em função da altura de queda líquida.

3. ENGOLIMENTO MÁXIMO CONSIDERANDO AS CURVAS DA TURBINA E DO GERADOR

Esta seção descreve-se as modificações realizadas na versão 21.9 do modelo DECOMP, onde a vazão máxima das usinas hidroelétricas passou a considerar as limitações tanto da turbina como do gerador.

3.1 Cálculo do engolimento máximo das turbinas sem haver vertimento

O engolimento máximo total do conjunto de turbinas de uma usina hidroelétrica, dada uma determinada vazão defluente q_{def} , pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$q_{max_T} = \left(\frac{h_l(q_{def})}{h_{ef}} \right)^\alpha \cdot q_{ef} \quad (2)$$

onde:

h_l : altura de queda líquida da usina;

h_{ef} : altura de queda efetiva da usina, dada pela média das alturas efetivas (de cadastro) dos conjuntos de unidades geradoras da usina, ponderadas pelo número de unidades em cada conjunto;

q_{ef} : vazão efetiva da usina, que corresponde à soma das vazões efetivas de cadastro de suas unidades geradores;

α : fator que depende do tipo das turbinas da usina:

=> 0,5 para turbinas Francis e Pelton;

=> 0,2 para turbinas Kaplan.

Como se observa em (2), para a determinação de q_{max_T} é necessário conhecer o valor de altura de queda líquida, que por sua vez depende do volume do reservatório e da vazão defluente, que são variáveis de decisão do problema DECOMP. Entretanto, o cálculo desse turbinamento máximo deve ser realizado *a priori*, antes de se resolver o problema de otimização do modelo DECOMP. Para contornar essa questão, considera-se um cálculo *a priori* de q_{max_T} , com as seguintes premissas:

- para a cota de montante (h_{mon}), adota-se o volume armazenado das usinas no início do estudo (V_{inic}), já que se desejam resultados mais acurados para os primeiros períodos (semanas);
- Como o engolimento máximo diminui com a vazão defluente, assume-se a princípio uma hipótese de que a vazão defluente q_{def} corresponde ao turbinamento máximo da usina, pois é o valor até o qual há um estímulo natural para que a usina deflua, já que a partir deste valor haverá vertimentos.

Esta segunda hipótese leva a um caráter recursivo para o valor da cota de jusante (h_{jus}), uma vez que a mesma é afetada pelo próprio valor de turbinamento máximo que se deseja calcular. A expressão (3) ilustra esse aspecto:

$$q_{max_T} = \left(\frac{h_{mon}(V_{inic}) - h_{jus}(q_{max_T}) - perdas}{h_{ef}} \right)^\alpha \cdot q_{ef}, \quad (3)$$

onde o termo *perdas* corresponde às perdas de queda fornecidas no cadastro que, dependendo da usina, podem ser dadas em % ou em valor absoluto (m).

Este efeito recursivo é contornado adotando-se, para o cálculo de q_{max_T} , o resultado $q_{max_T}^{iter}$ do algoritmo iterativo ilustrado na Figura 2, onde k indica o número da iteração e adotou-se o valor de $1\text{m}^3/\text{s}$ para a tolerância δ .

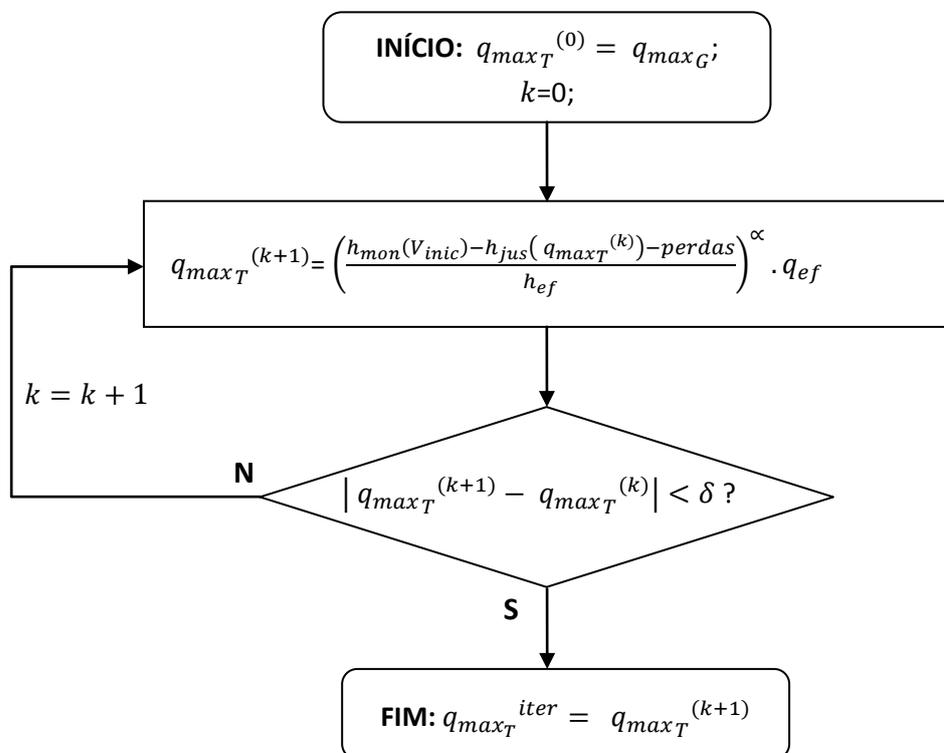


Figura 2 - Cálculo recursivo para o engolimento máximo da turbina de uma unidade geradora.

3.2 Consideração da defluência mínima obrigatória no cálculo de q_{max_T}

Quando o turbinamento da usina estiver no seu valor máximo e houver vertimentos influenciando a cota do canal de fuga, o valor de q_{max_T} calculado em 3.1 (que assumiu $q_{def} = q_{max_T}$) será otimista, uma vez que a vazão vertida eleva a cota do canal de fuga,

diminuindo ainda mais o valor de q_{max_T} . Embora não seja possível prever *a priori* essa possibilidade de vertimento, já que a defluência é resultado do problema de otimização, há situações em que o vertimento é inevitável e pode ser detectado antes de se resolver o problema de otimização.

Com base na diferença entre as afluições totais naturais (Q_{nat}) a cada usina hidroelétrica i e ao conjunto M_i de reservatórios à montante de i , e levando-se em consideração os volumes armazenado inicial e máximo (V_{max}) de i , pode-se calcular uma defluência mínima obrigatória (Q_{defmin}) da usina hidroelétrica i , como segue:

$$q_{defmin_i} = \max \{0, (Q_{nat_i} - \sum_{j \in M_i} Q_{nat_j}) - (V_{max_i} - V_{inic_i})\},$$

onde a primeira parcela do termo não nulo à direita corresponde à afluição natural que chega à usina i e a segunda parcela corresponde ao armazenamento existente no reservatório para absorvê-la. Portanto, se a diferença entre essas parcelas for positiva, haverá uma defluência mínima obrigatória. Duas situações ainda podem ocorrer nesse caso:

- $q_{defmin_i} < q_{max_T}^{iter}$: neste caso, a defluência mínima obrigatória é menor do que o "estimulo" máximo de defluência para o reservatório, e mantém-se o valor $q_{max_T}^{iter}$ para o cálculo do engolimento máximo;
- $q_{defmin_i} > q_{max_T}^{iter}$: neste caso, haverá vertimento e o valor de engolimento máximo é calculado com base no valor de q_{defmin_i} .

Desta forma, o valor q_{max_T} a ser adotado para o engolimento máximo das turbinas do gerador será dado por:

$$q_{max_T} = \left(\frac{h_l(q_{def})}{h_{ef}} \right)^\alpha q_{ef} \quad , \quad (5)$$

onde $q_{def} = \max \{q_{defmin_i}, q_{max_T}^{iter}\}$.

3.3 Engolimento máximo da usina para o problema de otimização

Segundo os procedimentos descritos nesta seção, os valores de q_{max_T} e q_{max_G} ficam definidos antes de se resolver o problema de otimização no DECOMP, e toma-se o menor deles para definir o valor de q_{max} de cada turbina. Matematicamente, esta condição pode ser expressa, de forma simplificada, como segue:

$$q_{max} = \min\{q_{max_T}, q_{max_G}\}, \quad (7)$$

onde q_{max_G} é dado por (1) e q_{max_T} é dado por (5).

Ressalta-se que nos estágios em que as usinas apresentarem volumes nos reservatórios muito diferentes dos volumes iniciais, esta aproximação pode incorrer em violações do engolimento máximo real, ou em valores inferiores aos exatos, os quais podem ser obtidos a partir do ponto de operação determinado pelo modelo DECOMP. As situações em que ocorrem essas violações são sinalizadas no arquivo `avl_turb_max.xxx`.

4. REFERÊNCIAS

- [1] CEPEL - Manual de Referência do modelo DECOMP, versão 21, Jan. 2015.