

Analysis of the influence of hydrology and the number of units in the average hydraulic loss

Análise da influência da hidrologia e do número de unidades na perda de carga média

Fabricio Muller¹
Roberto Eugenio Bertol¹

¹Intertechne
fm@intertechne.com.br
reb@intertechne.com.br

Abstract: Along with NEWAVE, the MSUI is one of the Brazilian official calculation models for “firm energy”, the limit energy that can be contracted by hydroelectric plants. Version 3.2 of MSUI adopts a constant value for the hydraulic loss, regardless of possible operating conditions of the hydroelectric plant. MSUI version 3.3, launched in early 2014, allows for the simulation to be performed considering varying losses. Given the similarity of results between the two versions and also given the importance of the average hydraulic loss in calculating the “firm energy”, the aim of the paper is to analyse the variation of the average hydraulic loss against hydrological variability and the number of generating units. It is concluded that the relationship between average and maximum losses increases both with the permanence time of inflows that exceed the maximum turbine discharge and with the number of installed units.

Keywords: MSUI, EPE, hydraulic loss.

Resumo: Juntamente com o NEWAVE, o MSUI é um dos modelos oficiais de cálculo de garantia física no Brasil. A versão 3.2 do modelo adota um valor constante para a perda hidráulica, independentemente da possível condição de operação da usina hidrelétrica. A versão 3.3 do MSUI, lançada no início de 2014, permite que a simulação seja efetuada considerando perdas variáveis. Tendo em vista a similaridade de resultados entre as duas versões e também a importância da perda hidráulica média no cálculo da

garantia física de uma usina hidrelétrica, o objetivo do artigo é analisar a variação da perda média com a variabilidade hidrológica e com o número de unidades geradoras. Conclui-se que a relação entre perdas de carga média e máxima aumenta tanto com a permanência no tempo das vazões afluentes que superam a vazão máxima turbinada, como com o número de unidades instaladas.

Palavras-Chave: MSUI, EPE, perda de carga.

1 Introdução

A Lei nº 10.848/04, regulamentada pelo art. 2º do Decreto nº 5.163/04, estabelece que *garantia física* é a quantidade máxima de energia elétrica associada ao empreendimento, incluindo importação, que poderá ser utilizada para comprovação de atendimento de carga ou comercialização por meio de contratos [1]. Parte fundamental no cálculo da garantia física, a obtenção da energia firme - calculada como a média do período crítico do Sistema Interligado Nacional (junho de 1949 a novembro de 1956) - é feita com o modelo MSUI, da Eletrobras [2]¹.

A versão 3.2 do MSUI adota valores constantes para o rendimento do conjunto turbina-gerador e perda hidráulica, independentemente da possível condição de operação da usina hidrelétrica [3]. Estes valores frequentemente são oriundos de orientações da Eletrobras (item 4.6.1 do Manual de Inventário [4]). Neste artigo utiliza-se o critério de cálculo de perdas médias para utilização do MSUI apresentado pela EPE [3].

A versão 3.3 do modelo, lançada no início de 2014, permite que a simulação seja efetuada com perdas variáveis (embora o rendimento permaneça constante) [5]. Um artigo dos autores [6] compara as duas modelagens - “EPE”, com o MSUI 3.2, e “MSUI 3.3”, com perdas variáveis, chegando às seguintes conclusões:

- Em termos de valor absoluto de energia firme, a diferença entre as duas modelagens é pequena;
- Para quedas de referência relativamente altas em relação às quedas líquidas resultantes da simulação, a simulação “EPE” tende a apresentar energias médias e firmes maiores que aquelas calculadas na simulação “MSUI 3.3”;
- Para quedas de referência menores, por outro lado, a tendência apresentada no item (b) se inverte.

Tendo em vista a importância da perda hidráulica média no cálculo da energia firme - e, conseqüentemente, da garantia física - de uma usina hidrelétrica, o objetivo deste artigo é fazer análises de sensibilidade da perda hidráulica média com a variabilidade hidrológica e o número de unidades geradoras. A partir da conclusão apresentada no item (a), acima, considerou-se que a utilização do critério da EPE [3] para o cálculo da perda média ponderada é válido para os objetivos do trabalho.

¹ O modelo NEWAVE, do Cepel, é o outro modelo necessário para o cálculo da garantia física [2].

O artigo se divide nos seguintes itens:

- Formulação do problema;
- Estudo de caso para a UHE Garibaldi;
- “Análise global” com as usinas que constam no deck do MSUI para o Leilão A-5/2012, fornecido pela EPE [7].

2 Formulação

O trabalho da EPE [3] apresenta dois critérios para o cálculo da perda hidráulica média ponderada pela energia: com e sem curva de colina de rendimentos. Por se concentrar nas perdas de carga, este artigo utiliza apenas o critério sem curva de colina, em que se determina a perda hidráulica média ponderada (Δh_{med}) no circuito de geração de maneira simplificada, utilizando apenas dados disponíveis na saída de simulação do modelo MSUI, por meio da equação 1:

$$\Delta h_{med} = \frac{\sum_{m=1}^{n_{per}} \{P_{em} \times \Delta h [q_{u_m}, \text{Min}(q_{defl_m}, \overline{q_{tot_m}})]\}}{\sum_{m=1}^{n_{per}} P_{em}} \quad (1)$$

onde:

n_{per} : número m de períodos da simulação;

P_{em} : produção energética média (MW médios) disponível no relatório de saída da usina na simulação MSUI;

$\Delta h [q_{u_m}, \text{Min}(q_{defl_m}, \overline{q_{tot_m}})]$: função de perda hidráulica, que relaciona as perdas hidráulicas com as vazões turbinadas unitária e total. Segundo o trabalho da EPE [3], ao longo da aplicação original daquele estudo, verificou-se a necessidade de representar a função de perda hidráulica genericamente, possibilitando assim qualquer método de ajuste como: polinomial, exponencial e inclusive via função definida por sentenças. Para este trabalho, o formato da função de perda hidráulica é apresentado na equação (3);

$\overline{q_{tot_m}}$: engolimento máximo (m^3/s) no período m, disponível no relatório de saída da usina na simulação MSUI;

q_{defl_m} : vazão defluente total (m^3/s) no período m, originária da execução do modelo MSUI;

q_{u_m} : estimativa simplificada de vazão turbinada unitária (m^3/s), dada pela equação 2,

$$q_{u_m} = \frac{\text{Min}(q_{defl_m}, \overline{q_{tot_m}})}{\frac{\text{Min}(q_{defl_m}, \overline{q_{tot_m}})}{q_{u_m}}} \quad (2)$$

onde:

$$[x] = \min \{m \in \mathbb{Z} \mid m \geq x\}$$

$\overline{q_{u_m}}$: vazão unitária turbinável máxima

As perdas Δh do circuito fechado podem ser calculadas pela função expressa na equação 3,

$$\Delta h = k_{unit} \times (q_{turbunit})^2 + k_{comum} \times (q_{turbtot})^2 \quad (3)$$

onde:

k_{unit} e k_{comum} : coeficientes de perdas de carga (s^2/m^5) respectivamente para os circuitos individuais (unitário) de cada unidade geradora e para o circuito comum a todas as unidades geradoras, que conduzem à vazão turbinada total;

$q_{turbunit}$ e $q_{turbtot}$: vazões turbinadas (m^3/s) unitária e total.

O circuito unitário corresponde à parte do circuito em que a vazão turbinada é separada por unidade geradora, como nos trechos próximos às turbinas. Já o circuito de vazão comum é aquele referente ao trecho em que toda a vazão turbinada passa por um único conduto, comum a todas as unidades, como um túnel ou canal, antes ou depois de chegar às turbinas. Em circuitos curtos muitas vezes toda a perda pode ser unitária; em circuitos longos, por outro lado, é frequente a perda unitária ser muito pequena em relação à perda do circuito de vazão comum.

Seja Δh_{max} a perda máxima em metros, calculada segundo a equação (3) para a condição de vazão máxima turbinada ($q_{turbtotmax}$). Em outro artigo [8], os autores analisaram diversas usinas com circuito conhecido, chegando à relação empírica representada na expressão 4.:

$$\frac{\Delta h_{max}}{\Delta h_{med}} \cong 1,5 \quad (4)$$

Ao mesmo tempo em que a expressão (4) apresentou bons resultados para os aproveitamentos analisados, o artigo citado também mostrou que existe uma tendência de que a relação $\Delta h_{max} / \Delta h_{med}$ atinja valores mais altos para a região em que $P[Q > q_{turbtotmax}]$ (a probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinada) seja menor. A Figura 1, reproduzida de [8], mostra este efeito.

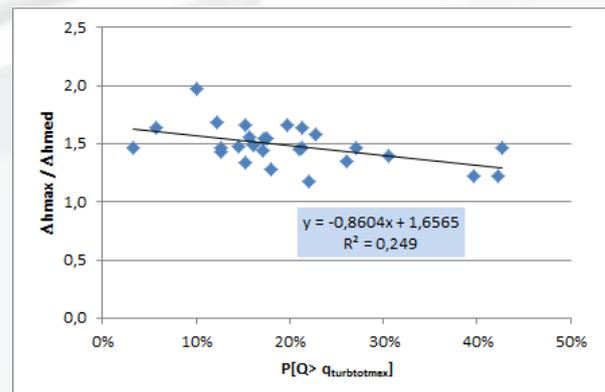


Figura 1: Relação $\Delta h_{max} / \Delta h_{med}$ contra a probabilidade de que a vazão afluente seja maior do que a máxima turbinada ($P[Q > q_{turbtotmax}]$) – reproduzida de [8]

O efeito apresentado na Figura 1 ocorre porque à medida em que se opera por mais tempo na vazão máxima turbinável, também se opera por mais tempo na perda

máxima, de modo que se as vazões afluentes forem sempre superiores ao máximo turbinado ($P[Q > q_{\text{turbtotmax}}] = 100\%$) os valores das perdas média e máxima se igualarão e a relação tenderá a igualar a unidade quando este valor for igual a 100%.

3 Estudo de caso: UHE Garibaldi

Para avaliar a influência da hidrologia e do número de unidades na perda média foi analisado o caso da UHE Garibaldi, em Santa Catarina. Os dados do aproveitamento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados da UHE Garibaldi

Parâmetro	Resultado
Anos de observação	80
Potência (MW)	189
Número de unidades	3
Vazão máxima turbinada (m^3/s)	499,8
Queda de referência (m)	41,9
Queda bruta (m)	44,3
k_{unit}	2,881300E-05
k_{comum}	2,975400E-06
Perda máxima Δh_{max} (m)	1,54
Perda média Δh_{med} (m)	0,92
$\Delta h_{\text{max}} / \Delta h_{\text{med}}$	1,68
$P[Q > q_{\text{turbtotmax}}]$	0,12
Energia média (MW médios)	92,51
Fator de capacidade (FC)	0,49

A formulação de cálculo da perda média da EPE, apresentada no item 2, utiliza a vazão defluente total em sua simulação, evitando assim que as perdas por indisponibilidade do MSUI distorçam os resultados de perdas hidráulicas. Além disso, outro aspecto importante deste critério é que a vazão defluente total é uma saída do MSUI que não leva em conta a modulação em dois patamares do modelo. Por outro lado, os decks de dados do MSUI comumente publicados pela EPE em seu site (epe.gov.br) costumam considerar uma modulação com três horas de ponta, e este critério também foi considerado nas simulações deste artigo a fim de que utilizem este critério considerado nas simulações oficiais do sistema elétrico brasileiro.

3.1 Avaliação da influência do regime hidrológico sobre a perda de carga média

O primeiro estudo consiste em verificar como a perda média Δh_{med} (ver equação 1) calculada com o critério da EPE [3], é afetada pela variação da hidrologia. Para isto, foi feita uma modificação no arquivo vazoes.dat do MSUI, de modo que todas as vazões de todas as usinas i do deck considerado passassem a ter a média de longo termo de Garibaldi ($QMLT_{\text{Garibaldi}} = 266,9 \text{ m}^3/\text{s}$, referente ao período 1931/2010), mantendo no entanto suas próprias variabilidades. Isto é feito por meio da seguinte modificação, em todos os meses m do período histórico:

$$Q'_{i,m} = Q_{i,m} \cdot \frac{QMLT_{\text{Garibaldi}}}{QMLT_i} \quad (5)$$

onde $Q'_{i,m}$ é a nova vazão, $Q_{i,m}$ é a vazão original e $QMLT_i$ é a vazão de longo termo da usina i . A próxima modificação é

no arquivo *hidexp1.dat* do MSUI, de modo que todas as usinas passam a ter as características de Garibaldi. Deste modo, a UHE Garibaldi passa a ser simulada várias vezes no MSUI - cada uma delas com uma série com variabilidade diferente, mas vazão de longo termo igual. Para cada uma destas "UHE Garibaldi" distintas se calcula Δh_{med} pela fórmula expressa na equação (1).

A probabilidade de que a vazão afluente seja maior do que a vazão máxima turbinada $P[Q > q_{\text{turbtotmax}}]$ tem uma boa relação com a indisponibilidade, conforme apresentado em outro artigo dos autores [9], e no presente caso também se pensou em relacionar esta grandeza com Δh_{med} . A Figura 2 mostra o resultado desta relação. O losango em vermelho na figura apresenta o caso da hidrologia real de Garibaldi.

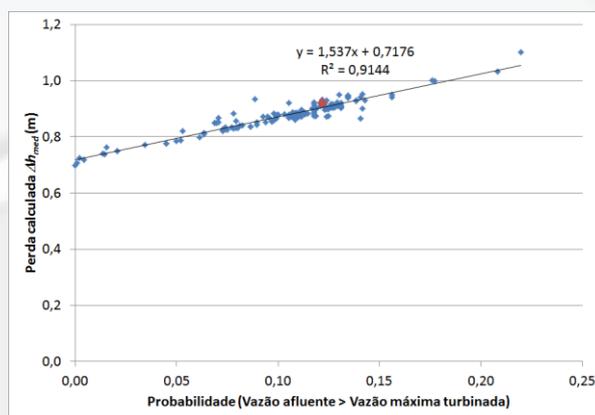


Figura 2: Perda média Δh_{med} calculada em função de diferentes hidrologias para a UHE Garibaldi. O losango vermelho na figura é o caso com a hidrologia real do aproveitamento.

Uma análise da Figura 2 mostra uma forte relação entre as perdas calculadas e a probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a vazão máxima turbinada. A estes pontos foi ajustada uma reta, com coeficientes apresentados na própria Figura 2, cujo valor do coeficiente de determinação R^2 resultante é igual a 0,9144. Isto ocorre porque, conforme a equação (3), a perda é proporcional ao quadrado da vazão, atingindo o valor máximo quando a vazão é igual à máxima turbinada. Assim, quanto mais frequentemente seja atingido este limite na série histórica (e consequentemente maior o valor de $P[Q > q_{\text{turbtotmax}}]$), maior a perda média.

Outra conclusão importante a que se pode chegar a partir da Figura 2 é que circuitos de geração absolutamente iguais podem ter uma perda média diferente, caso estejam em rios com variabilidade de aflúências distintas (importante lembrar que todas as aflúências consideradas na simulação têm uma mesma média de longo termo, igual a $266,9 \text{ m}^3/\text{s}$). Isto mostra uma vulnerabilidade importante no critério do Manual do Inventário [4] – utilizado não só em estudos de Inventário, com também em muitos estudos de Viabilidade – de considerar uma perda média de 2% da queda bruta para circuitos curtos e de 3% em circuitos longos, sem levar em conta a variabilidade hidrológica em que a usina está inserida.

A Figura 3 apresenta a relação $\Delta h_{max}/\Delta h_{med}$ para os pontos apresentados na Figura 2.

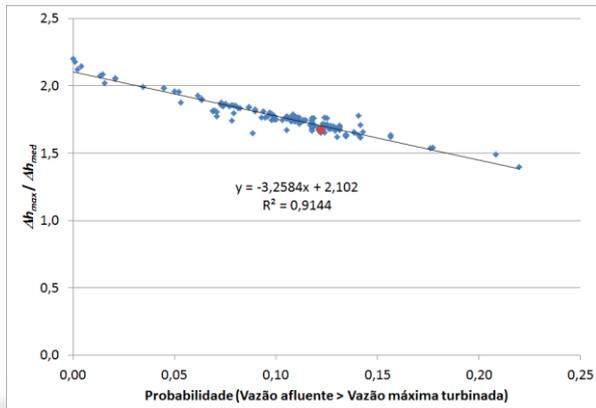


Figura 3: Relação $\Delta h_{max}/\Delta h_{med}$ em função de diferentes hidrologias para a UHE Garibaldi. O losango vermelho na figura é o caso com a hidrologia real do aproveitamento.

Uma análise da Figura 3 mostra uma tendência de que a relação $\Delta h_{max}/\Delta h_{med}$ atinja valores mais altos para a região em que $P[Q > q_{turbtotmax}]$ seja menor, do mesmo modo que em Müller e Bertol [9]. Importante ressaltar que a maioria dos valores de $\Delta h_{max}/\Delta h_{med}$ na Figura 7 é maior que 1,5 (ver fórmula 4) porque o próprio valor de $\Delta h_{max}/\Delta h_{med}$ para Garibaldi é de 1,68 (ver Tabela 1).

3.2 Avaliação da influência do número de unidades geradoras sobre a perda de carga média

O próximo estudo diz respeito à relação entre a perda média calculada Δh_{med} e o número de unidades. Garibaldi tem três máquinas instaladas, e é analisada aqui uma variação de uma a cinco unidades.

O objetivo do estudo é analisar, dadas a mesma vazão de engolimento e a mesma potência instalada da usina, qual a variabilidade da perda de carga média quando se modifica o número de unidades. Em outro artigo [10] os autores fizeram análise semelhante, mas analisando o rendimento médio ponderado e não a perda média. A conclusão daquele estudo é que o rendimento médio ponderado tende a aumentar com o aumento do número de máquinas, dadas a mesma potência e a mesma vazão de engolimento da usina.

Para isto, admite-se a premissa de que a perda máxima para o circuito unitário e a perda máxima para o circuito comum se mantêm para os diferentes casos. Do mesmo modo que no outro artigo dos autores [10], esta premissa é baseada nas seguintes considerações:

- Como a UHE Garibaldi é a fio d'água, assume-se que as perdas de carga máximas unitária e do circuito comum são as mesmas para toda a variação de número de unidades. Neste caso, assume-se que para cada aumento (ou diminuição) do número de máquinas, os condutos unitário e do circuito comum devem ter suas

dimensões diminuídas (ou aumentadas) para a manutenção da perda.

- Assume-se que a queda de referência é a mesma para todos os casos analisados. Dado que a configuração utilizada de Garibaldi é a fio d'água, esta premissa é coerente com o critério da Eletrobras (1997), de igualar a queda de referência à queda líquida com 95% de permanência.
- Conforme citado anteriormente, a potência instalada e a vazão de engolimento total são constantes para todos os casos de número de máquinas.

Estas premissas têm limitações evidentes - na prática, quando se altera o número de unidades, novas máquinas, com novas dimensões, devem ser projetadas para cada caso - mas considerou-se que elas são justificáveis para os objetivos do estudo.

A partir do exposto, levando-se em conta a Tabela 1, conclui-se que a perda máxima para o circuito comum é igual a $2,975400E-06 \times (499,8)^2 = 0,743$ m e a perda máxima para o circuito unitário é igual $2,881300E-05 \times (499,8/3)^2 = 0,800$ m. Com a modificação do número de unidades, o valor de k_{comum} (ver equação 3) permanece o mesmo, já que a vazão máxima turbinada total não se modifica. O valor de k_{unit} , por outro lado, se modifica para cada número de unidades N_{maq} , pela equação:

$$k_{unit} = \frac{0,800}{\left(\frac{499,8}{N_{maq}}\right)^2} \quad (6)$$

A partir do exposto, a perda média calculada Δh_{med} em função do número de unidades para Garibaldi é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Perda média calculada Δh_{med} (m) em função do número de unidades para a UHE Garibaldi

Número de unidades	1	2	3	4	5
Perda de carga média (m)	0,79	0,87	0,92	0,95	0,97

A Tabela 2 mostra que a perda média calculada aumenta com o número de unidades, quando se mantém a vazão de engolimento total da usina. Isto ocorre porque, para otimizar o rendimento, o critério da EPE faz com que a usina opere sempre com o mínimo número possível de unidades em cada mês e com a mesma vazão em todas as unidades (ver equação 2). Deste modo, quanto maior o número de máquinas, mais frequentemente a vazão turbinada será próxima da máxima unitária - aumentando assim a perda média. Considerando as diversas aflúncias levadas em conta acima, a Figura 4 apresenta as perdas médias em Garibaldi em função do número de unidades instaladas. Os valores correspondentes à linha cheia desta figura se referem à própria aflúncia de Garibaldi.

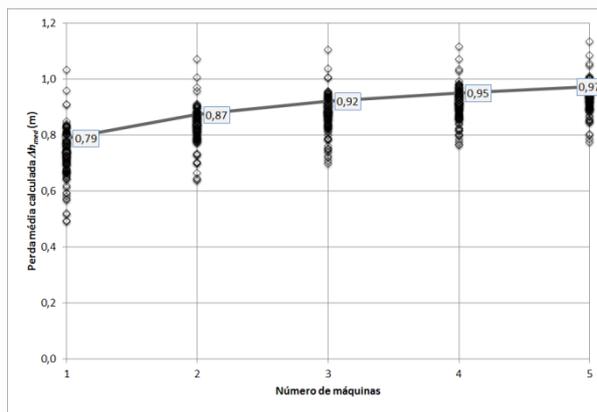


Figura 4: Perda média Δh_{med} em Garibaldi como função do número de unidades e de diversas variabilidades de afluência (a linha cheia, com os valores correspondentes, se refere à própria afluência local).

Uma análise da Figura 4 mostra, além do aumento da perda média com o número de unidades comentado anteriormente, que a dispersão das perdas médias em função da hidrologia diminui com o aumento do número de unidades. Isto acontece porque, com mais unidades instaladas, a tendência é que a perda esteja mais tempo próxima da máxima unitária, independentemente da variabilidade hidrológica. Novamente esta análise reforça a precariedade de desconsiderar o número de unidades geradoras no critério proposto no Manual de Inventário para estudos mais avançados.

3.3 Análise global

Para a próxima análise, chamada de “global” por levar em conta a grande maioria das UHEs brasileiras, foi considerado o deck (conjunto de arquivos com dados básicos para simulação energética) do MSUI referente ao Leilão A-5/2012, cálculo da garantia física da UHE Cachoeira Caldeirão2. Este deck será chamado daqui por diante de deck A-5/2012.

A partir das conclusões apresentadas anteriormente, este item analisa quais seriam os valores resultantes do cálculo das perdas médias das usinas do deck A-5/2012 em função da probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinada e do número de máquinas. Para isto, inicialmente se fazem as seguintes modificações no deck A-5 2012:

- Para concentrar os efeitos nas vazões afluentes, foram eliminadas as cascatas do deck, assim como as vazões de uso consuntivo e evaporações. Para eliminar as cascatas do deck utiliza-se o seguinte procedimento: zera-se o campo do arquivo hidrexp1.dat de dados do MSUI referente à usina

² Endereço eletrônico

<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202012/Leil%C3%A3oA-52012Nteconjuntodearquivosdetalham%C3%A1culodagarantia%C3%ADsícadaUHECachoeiraCaldeir%C3%A3o.aspx>, acessado em 15 de abril de 2013.

de jusante para todos os aproveitamentos, fazendo com que todas as usinas do deck operem isoladas (ou seja, sem aproveitamentos a jusante e a montante na cascata).

- No deck do MSUI utilizado, algumas usinas, como Belo Monte, apresentam indisponibilidades diferentes das de Bracier (ver, por exemplo, EPE, 2011). Para uniformizar as alternativas, utilizaram-se as indisponibilidades de Bracier em todas as usinas.
- Foram eliminadas algumas poucas usinas que apresentaram resultados inesperados.

Nos circuitos dos aproveitamentos existem tanto perdas de carga de trecho de circuito comum a todas as unidades quanto perdas unitárias. Entretanto, como o objetivo do artigo é fazer análises de sensibilidade quanto aos fatores que modificam a perda média, serão considerados dois casos teóricos para o aproveitamento:

- Aproveitamentos considerados apenas com circuito de vazão comum.
- Aproveitamentos considerados apenas com circuitos unitários.

A vantagem desta divisão é que, a partir de uma perda máxima estimada Δh_{max} , pode-se calcular os valores de k_{unit} e k_{comum} para os dois casos teóricos, através das funções obtidas a partir da equação (3):

$$\Delta h_{max} = k_{unit} \times (q_{turbunitmax})^2 \quad (7)$$

$$\Delta h_{max} = k_{comum} \times (q_{turbototmax})^2 \quad (8)$$

onde $q_{turbunitmax}$ é a vazão turbinada unitária máxima (m^3/s) e $q_{turbototmax}$ é a vazão turbinada total máxima (m^3/s).

Para a simulação desejada é necessário ter o valor da perda máxima de cada usina, que será usada para o cálculo da perda média. Para obter um dado de entrada destas perdas máximas, foi efetuada uma estimativa da perda máxima, definindo-se $\Delta h_{maxMSUI}$ com a função derivada da fórmula (4):

$$\Delta h_{maxMSUI} = 1,5 \times PerdaMSUI \quad (9)$$

Onde a variável $PerdaMSUI$ é a perda média apresentada no deck A-5/2012.

Conforme pôde ser observado nas análises anteriores, esta relação não é constante e os dados de perda de carga média apresentados no MSUI podem não ser confiáveis, pois muitas vezes este valor é definido como um percentual de queda bruta. No entanto, como o valor da perda de carga acaba sendo uma escolha do projetista, assumiu-se que os valores de perda máxima utilizados para esta análise são adequados para o teste de hipótese que recalculará as perdas médias a partir do valor das máximas para as diferentes usinas listadas no deck em questão.

Para esta análise, considerou-se a relação $\Delta h_{maxMSUI} / \Delta h_{med}$ (onde Δh_{med} é a perda média calculada pela equação 1) para relacionar com $P[Q > q_{turbototmax}]$.

A Figura 5 apresenta os resultados da análise para os aproveitamentos considerados apenas com circuito de vazão comum, e a Figura 6 apresenta os resultados com aproveitamentos apenas com circuitos unitários. Nestas curvas é apresentada uma regressão logarítmica para indicar que $\Delta h_{maxMSUI} / \Delta h_{med}$ tende a 1 quando $P[Q > q_{turbtotmax}]$ também tende a 1.

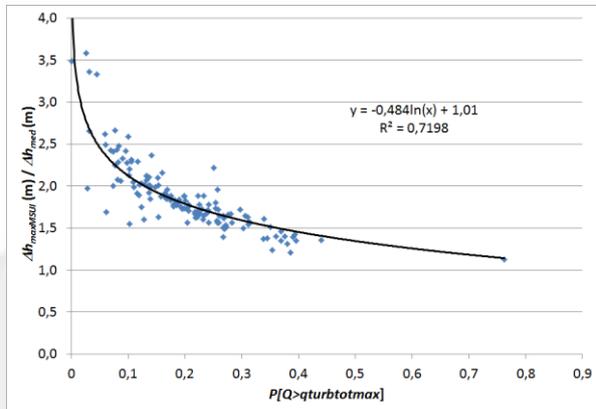


Figura 5: Adimensional $\Delta h_{maxMSUI} / \Delta h_{med}$ (perda máxima calculada com a equação (9) sobre a perda média calculada com a equação (1) em função da probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinada, para as usinas do deck A-5/2012. Usinas consideradas apenas com circuito de vazão comum.

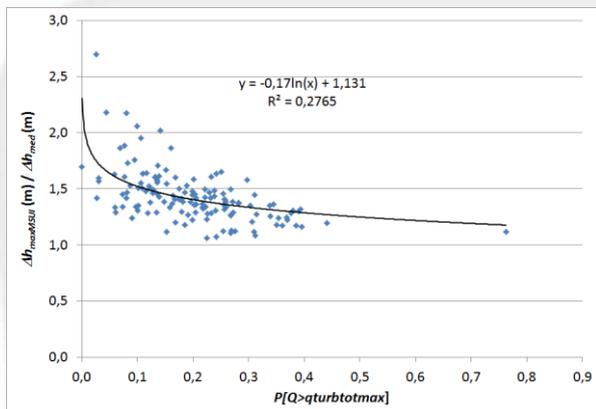


Figura 6: Adimensional $\Delta h_{maxMSUI} / \Delta h_{med}$ (perda máxima calculada com a equação (9) a perda média calculada com a equação (1) em função da probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinada, para as usinas do deck de Cachoeira Caldeirão. Usinas consideradas apenas com circuito de vazão unitária.

Uma análise das Figuras 5 e 6 mostra que, quando se considera circuito de vazão total, o ajuste da curva é muito melhor do que quando se considera circuito de vazão unitária (R^2 de 0,7198 contra 0,2765). Isto ocorre porque, para o segundo caso, o número de máquinas influencia no resultado, dispersando os valores em relação à reta estimada.

A Figura 6 apresenta uma tendência de que $\Delta h_{maxMSUI} / \Delta h_{med}$ chegue a valores próximos de 1,5, conforme a fórmula (4). Isto não acontece na Figura 5 porque ao considerarmos que a perda máxima é 1,5 vezes a média declarada no MSUI em

cada caso, estamos superestimando o valor da perda máxima para o caso de circuitos comuns, o que em contraparte vai elevar o valor da média calculada a partir da máxima quando usando a metodologia da EPE.

Outra conclusão que se tira da comparação das duas figuras é que existe um efeito claro na consideração se as perdas são de circuitos comuns ou independentes.

Para análise da influência do número de máquinas na perda de carga, considerou-se que todas as usinas têm apenas circuito unitário. Para cada uma delas calculou-se a relação $\Delta h_{med,nmaq} / \Delta h_{med,nmaq+k}$, onde $\Delta h_{med,nmaq}$ é a perda calculada pela equação (1) (critério da EPE) para o número de unidades real para cada usina, apresentado no deck A-5/2012. Calcula-se então as perdas $\Delta h_{med,nmaq+k}$, variando o número de máquinas para valores de $k = -2, -1, \dots, 3, 4$. Os resultados são apresentados na Figura 7. As médias da Figura 7 são apresentadas na Figura 8.

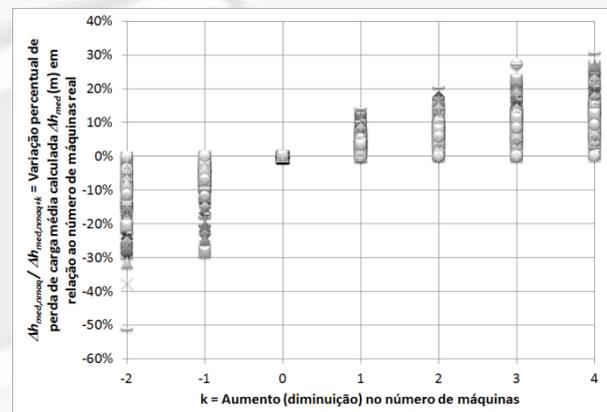


Figura 7: Variação percentual de perda de carga média calculada Δh_{med} (m) em relação ao número de máquinas real.

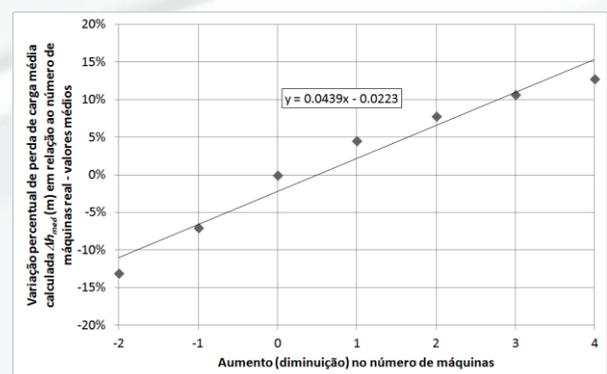


Figura 8: Valores médios da variação percentual de perda de carga média calculada Δh_{med} (m) em relação ao número de máquinas real.

Uma análise das Figuras 7 e 8 mostra uma forte relação entre a perda média calculada e o número de máquinas instaladas: do mesmo modo que no caso da UHE Garibaldi, quanto maior o número de unidades, maior a perda média. Importante ressaltar que se deve ter cuidado ao utilizar os

coeficientes da reta apresentada na Figura 8, já que duas simplificações importantes foram efetuadas:

1. A própria da fórmula (4) é uma relação não necessariamente real, apesar de ter apresentado bons resultados nas análises efetuadas;
- A consideração de que todas as usinas têm apenas circuito unitário.

4 Conclusão

As principais conclusões do trabalho são as seguintes:

- A variabilidade hidrológica e o número de unidades geradoras são fatores importantes que influenciam o resultado de perda de carga média.
- Quanto maior a permanência no tempo de vazões que superam a vazão máxima turbinada, maior é a perda de carga média em relação à perda máxima.
- Quanto maior o número de unidades geradoras, maior é a perda de carga média em relação à perda máxima quando se mantêm a vazão de engolimento e a potência total da usina.

O critério do cálculo da perda média apresentada do Manual do Inventário [4], que deveria ser utilizado para estudos preliminares, tem sido utilizado também em muitos estudos finais de inventário, chegando a ser usado até mesmo em estudos de viabilidade. Além de este critério não ter conduzido a bons resultados [8], as análises efetuadas mostram a forte correlação da perda média com outros fatores, notadamente a variabilidade hidrológica e o número de unidades geradoras. Tudo isto reforça a recomendação de que a perda média utilizada para simulação do MSUI deva ser calculada com precisão para cada diferente estudo – pelo menos no nível de estudos de viabilidade e básico.

Para análises futuras, recomenda-se a evolução do estudo no sentido de englobar perdas no canal de fuga, assim como efetuar análises de sensibilidade em relação ao próprio critério de perda média da EPE (2012).

Referências

- [1] CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Regras de Comercialização – Garantia Física – Versão 2013.1.0**. São Paulo, 2013.
- [2] MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2008). **Portaria MME n. 258**, de 28 de julho de 2008.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Metodologia de Cálculo de Parâmetros Energéticos Médios: Rendimento e Perda Hidráulica**. Rio de Janeiro, 2012.
- [4] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME/CEPEL. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**. Rio de Janeiro, 2007.
- [5] ELETROBRAS. **MSUI - Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – Manual de Metodologia – Versão 3.3**. Rio de Janeiro, 2014.
- [6] MÜLLER, F; BERTOL, R. E. Comparação de metodologias e resultados entre as versões 3.2 e 3.3 do MSUI quanto às perdas de carga. Artigo enviado para a publicação na **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**, do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, 2014.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Leilão A-5/2012: NT e conjunto de arquivos detalham cálculo da garantia física da UHE Cachoeira Caldeirão**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 5 de setembro de 2014.
- [8] MÜLLER, F; BERTOL, R. E. Análise de perdas de carga no MSUI. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens**. Ano I, no 1. pp. 8-13. Rio de Janeiro, 2014.
- [9] MÜLLER, F; BERTOL, R. E. (2013) - Análise da indisponibilidade no MSUI 2. Permanência de vazões afluentes. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves, 2013.
- [10] MÜLLER, F.; BERTOL, R.E.; ROSA, L.G.O.; LEVIS, F.D.; STAHLHOEFER, M.; CARVALHO, M.C. (2014). Análise da influência da hidrologia e do número de unidades no rendimento médio ponderado. **Anais do HydroVision Brasil 2014**. São Paulo, 2014.