

# Comparison between fixed and variable head losses in energy simulation

## Comparação entre perdas fixas e variáveis na simulação energética

Fabrizio Muller<sup>1</sup>  
Roberto Eugenio Bertol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Intertechne  
fm@intertechne.com.br  
reb@intertechne.com.br

**Abstract:** The official models for the firm energy calculation in Brazil, Suishi and Newave, both from “Centro de Pesquisas de Energia Elétrica” (Cepel), consider a constant loss in the simulation. Physically, on the other hand, the head losses vary with outflows. From the above, the purpose of this paper is to present a comparison between the results of energy simulations considering fixed and variable losses. The energy differences of firm energy between the two criteria resulted small, but two distinct trends were found: for relatively high reference heads in comparison to the observed net heads, the simulation with constant losses tends to have larger firm energy than those calculated with variable losses with the simulation “variable loss”. For relatively low reference net heads (95% of permanence), this tendency is reversed. The model considered for the simulations is MSUI, from Eletrobras.

**Keywords:** MSUI, EPE, fixed hydraulic loss, variable head losses.

**Resumo:** Os modelos oficiais do setor elétrico para o cálculo de garantia física, o Suishi e o Newave, ambos do Cepel, consideram uma perda constante na simulação. Fisicamente, por outro lado, a perda de carga é variável com a vazão defluente. A partir do exposto, o objetivo do presente artigo é apresentar uma comparação entre os resultados de simulações energéticas considerando perdas fixas e variáveis. As diferenças energéticas de energia firme entre os dois critérios resultou pequena, mas duas tendências distintas foram encontradas: para quedas de referência relativamente altas em relação às quedas líquidas, a simulação “perda constante” tende a apresentar

energias firmes maiores que aquelas calculadas com perdas variáveis com a simulação “perda variável”. Para quedas de referência relativamente baixas, esta tendência se inverte. O modelo considerado para as simulações é o MSUI, da Eletrobras.

**Palavras-Chave:** MSUI, EPE, perda de carga fixa, perda de carga variável.

### 1 Introdução

A Lei nº 10.848/2004, regulamentada pelo art. 2º do Decreto nº 5.163/2004, 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]. Este conceito é fundamental para o setor elétrico e o tema é bastante atual, uma vez que em 2016 um grupo coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) está procedendo à Revisão Ordinária de Garantia Física das usinas hidrelétricas do Sistema Elétrico Nacional (SIN), conforme preconizado pelo Decreto nº 2.655/1998 .

Os modelos oficiais do setor elétrico para o cálculo de garantia física, o Suishi e o Newave [2], ambos do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), consideram uma perda constante na simulação. Fisicamente, por outro lado, a perda de carga é variável com a vazão defluente.

A partir do exposto, o objetivo deste artigo é apresentar uma comparação entre os resultados de simulações energéticas considerando perdas fixas e variáveis. Para isso, utilizou-se o modelo MSUI, da Eletrobras, que era o modelo oficial brasileiro [3] para o cálculo de energia firme (média de energias geradas por simulação para o período crítico do Sistema Interligado Nacional, de junho de 1949 a novembro de 1956), até a publicação da Portaria MME 101, de 23 de março de 2016, quando o modelo correspondente passou a ser o Suishi.

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 [4]. Já a versão 3.3 do modelo permite que a simulação seja efetuada com perdas variáveis (embora o rendimento permaneça constante) [5].

Para o cálculo da perda hidráulica constante utilizou-se o critério apresentado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [4], anteriormente analisado em outro artigo dos autores [6].

Importante ressaltar que, para concentrar a análise nas perdas de carga fixas e variáveis, o artigo apresenta a influência da perda de carga variável em apenas uma hidrelétrica, sem analisar o impacto na carga crítica total no rateio do bloco hidráulico entre as usinas e na garantia física total do sistema.

O presente artigo é dividido em metodologia, estudo de caso e conclusões.

## 2 Formulação

### Critério EPE para perda constante

O critério da EPE [4] visa a calcular uma perda constante ( $\Delta h_{med}$ ) para simulação com o MSUI 3.2. Essa perda é obtida mediante ponderação com a produção energética média, disponível no relatório de saída da usina na simulação com o MSUI, para os períodos (ou meses)  $m = 1, \dots, n_{per}$  da simulação (onde  $n_{per}$  é o número total de períodos). Este critério foi descrito com detalhes em outro artigo dos autores [6].

### Critério de perdas variáveis do MSUI 3.3

Segundo o Manual de Metodologia do MSUI 3.3 [5], “para o cálculo da perda hidráulica variável mensalmente, considerou-se a divisão do circuito de geração em três partes. A primeira parte representa a perda hidráulica no canal de adução, a segunda parte representa a perda hidráulica no circuito de geração e a terceira parte representa a perda hidráulica no canal de fuga.” A perda total é dada pela soma das três perdas parciais. Ainda segundo o Manual de Metodologia do MSUI 3.3, “a implementação realizada permite a representação das perdas hidráulicas de cada parcela por polinômios de até quarto grau” (grifo nosso). “A perda hidráulica no canal de adução e no canal de fuga é calculada em função da vazão total turbinada e a perda hidráulica no circuito de geração é calculada em função da vazão unitária, que representa a vazão turbinada por uma unidade geradora. A vazão unitária é calculada todo mês e é função do engolimento máximo da unidade geradora e da vazão disponível para a geração de energia. Busca-se despachar o menor número de unidades possível, suficiente para engolir a vazão turbinada, de modo que a vazão unitária seja a maior possível. Considera-se a premissa de que a vazão turbinada é dividida igualmente entre as unidades despachadas.”

A seção a seguir apresenta alguns detalhes suplementares da simulação de perdas variáveis com o MSUI 3.3.

## 3 Estudo de caso

Este item apresenta o estudo de caso para comparação entre as modelagens com as versões 3.2 e 3.3 do MSUI. Ele é dividido nos seguintes itens:

- tipo de perda de carga hidráulica considerada e dados da usina estudada;
- análise dos patamares de carga;
- análise das vazões defluentes próximas ou maiores que a máxima turbinável.

Ressalte-se que o MSUI 3.3 também permite a simulação com perda constante, para compatibilidade com as versões anteriores. As simulações feitas para este artigo utilizam a versão 3.3 do modelo, com perda constante no caso da simulação com o critério da EPE, e com perdas variáveis, em caso contrário. Elas serão chamadas, daqui por diante, simplesmente de simulação “perda constante” (com perda

constante) ou simulação “perda variável” (com perda variável).

### 3.1 Tipo de perda de carga hidráulica considerada e dados da usina estudada

Por simplicidade, este artigo se concentra nas perdas de carga no circuito fechado, e não naquelas do canal de fuga. Consideram-se as perdas  $\Delta h$  do circuito na forma expressa na equação 1.

$$\Delta h = k_{unit} \times (Q_{turbunit})^2 + k_{adução} \times (Q_{turbtot})^2 \quad (1)$$

onde  $k_{unit}$  e  $k_{adução}$  são os coeficientes de perdas de carga ( $s^2/m^5$ ) respectivamente para os circuitos individuais (unitário) de cada unidade geradora e para a adução de todas as unidades geradoras, que conduzem à vazão turbinada total; e  $Q_{turbunit}$  e  $Q_{turbtot}$  são as vazões turbinadas ( $m^3/s$ ) unitária e total. Para a simulação com o MSUI 3.3, emprega-se a fórmula (1) inserindo-se os valores de  $k_{unit}$  e  $k_{adução}$  nos coeficientes de segundo grau dos polinômios de perda unitária e de adução total (ver item 2.2), respectivamente, zerando-se os demais coeficientes.

Para os estudos de caso foi considerada a UHE Garibaldi, em Santa Catarina. Os dados considerados para aproveitamento são apresentados na tabela 1. Para simplificar a análise e concentrá-la apenas nos efeitos da perda de carga na energia gerada, a UHE Garibaldi foi simulada de maneira isolada, ou seja, sem influência de efeitos de cascata a montante ou jusante, e sem desvios de água. Na configuração escolhida, a usina opera a fio d’água, já que  $NA_{max} = NA_{min}$  (tabela 1).

Tabela 1: Dados da UHE Garibaldi considerados para simulação.

Parâmetro	Valor
Potência (MW)	189
Número de unidades	3
Vazão máxima turbinada ( $m^3/s$ )	499,8
Queda de referência (m)	41,9
$NA_{max}$ (m)	705
$NA_{min}$ (m)	705
$k_{unit}$ ( $s^2/m^5$ )	$2,88 \times 10^{-5}$
$k_{adução}$ ( $s^2/m^5$ )	$2,98 \times 10^{-6}$
Perda máxima $\Delta h_{max}$ (m)	1,54
Perda média $\Delta h_{med}$ (m)	0,92

### 3.2 Análise dos patamares de carga

Neste item, compara-se o modo pelo qual as simulações “perda constante” e “perda variável” levam em conta os patamares de carga. Para auxiliar na compreensão do problema, duas características (comuns às duas versões) da simulação com o MSUI, a divisão por patamares e a perda energética por indisponibilidade, são descritas a seguir.

A simulação do modelo ocorre em dois patamares diários, em ponta e em fora de ponta (usualmente são considerados três horas de ponta na modelagem). Nos relatórios de saída das usinas do MSUI são apresentados os valores das vazões turbinadas, dos níveis de jusante e das energias geradas por patamar.

Quanto à indisponibilidade, na simulação energética com o MSUI, ela atua como uma diminuição na vazão máxima de engolimento, conforme descrito em outros artigos dos autores ([7], [8]). Explicitamente, tem-se que  $Q_{MAX}$ , a vazão máxima para produção de ponta ( $m^3/s$ ), é transformada na vazão máxima para produção de energia  $Q_{MAXindisp}$ , dada pela equação 2.

$$Q_{MAXindisp} = Q_{MAX} \times FC_{MAX} \quad (2)$$

onde  $FC_{MAX}$  é o fator de carga máximo para produção contínua de energia, definido como  $(1-TEIF) \times (1-IP)$ , onde  $TEIF$  é a taxa de indisponibilidade forçada, e  $IP$  é a taxa de indisponibilidade programada. Usualmente os valores de  $TEIF$  e  $IP$  são obtidos em função da potência unitária a partir da tabela de Bracier [7]. Por esta tabela,  $FC_{MAX} = 0,895809$  para a UHE Garibaldi.

A partir do exposto, para a simulação “perda variável” e perdas mensais na forma da fórmula (1), tem-se que a perda de carga  $\Delta h_m$  em cada período (ou mês)  $m$  é calculada pela ponderação com a energia entre os dois  $j$  patamares, de acordo com a equação 3.

$$\Delta h_m = \frac{\sum_{j=1}^2 [k_{unit} \times (Q_{t,j,m} / N_{maq,j,m})^2 + k_{adução} \times (Q_{t,j,m})^2] \times h_j \times E_{j,m}}{\sum_{j=1}^2 h_j \times E_{j,m}} \quad (3)$$

onde:

$h_j$ : número de horas diárias para patamar de carga  $j$ ;

$E_{j,m}$ ,  $Q_{j,m}$ ,  $N_{maq,j,m}$ : respectivamente, energia em MW médios, vazão turbinada em  $m^3/s$  (truncada na indisponibilidade, conforme a equação 2) e número de máquinas operadas para o patamar  $j$ , no período  $m$ . Embora a equação 3 não seja apresentada no manual do MSUI 3.3 [5], uma análise do relatório de saída do modelo por usina permite concluir que ela está correta. Para chegar a esta conclusão, comparou-se a perda mensal apresentada no relatório de saída da UHE Garibaldi com a aplicação direta da equação 3, e o resultado dessa comparação, para o período crítico do sistema interligado (junho de 1949 a novembro de 1956), é apresentado na figura 1. Pela proximidade das duas curvas, esta figura confirma que uma fórmula equivalente à equação 2 é utilizada no cálculo de perdas variáveis com o MSUI 3.3.

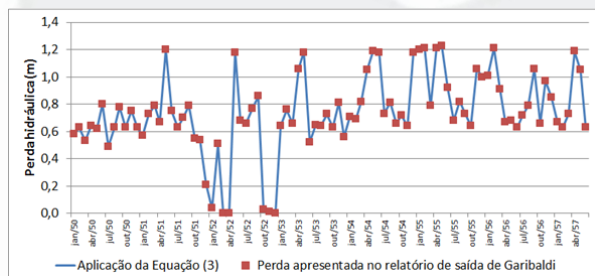


Figura 1: Perdas de carga mensais (m): comparação entre a aplicação da fórmula (3) com o valor apresentado no arquivo de relatório de saída para Garibaldi.

Como a saída de  $Q_{j,m}$  leva em conta a diminuição de vazões turbinadas pela indisponibilidade, a perda mensal não chega

na perda máxima efetiva em nenhum ponto da simulação. Para conferir esse efeito, foram efetuadas simulações em Garibaldi com e sem indisponibilidade. Na condição sem indisponibilidade, a perda máxima apresentada no relatório de saída da usina foi igual a 1,54 m (igual à perda máxima efetiva, conforme a tabela 1), enquanto que o valor correspondente para a simulação com indisponibilidade resultou significativamente menor, igual a 1,23 m. A modelagem da EPE, por outro lado, é bastante explícita na utilização de uma vazão não descontada da indisponibilidade [4]: “as informações necessárias ao problema de despacho unitário são: queda líquida disponível e vazão total disponível para turbinamento (vazão defluente total).” A seguinte nota de rodapé explicita: “**Ressalta-se a escolha da vazão defluente média total em detrimento da vazão turbinada média dada pelo MSUI. Nesta última já foram aplicados os índices TEIF e IP, e no despacho ótimo pretende-se encontrar a operação predominante para o período em questão, ou seja, sem considerar as indisponibilidades**” (grifo nosso). Por outro lado, a modelagem da EPE pondera as perdas com a energia descontada da indisponibilidade. Deste modo, a conclusão a que se chega é que, devido ao efeito da indisponibilidade, diferentemente do caso da simulação “perda constante”, em uma simulação convencional o critério da simulação “perda variável” faz com que não se atinjam as perdas máximas em nenhum momento da simulação. Por outro lado, a simulação “perda variável” leva em conta a divisão por patamares, aspecto não levado em conta na simulação “perda constante”.

Para avaliar os efeitos descritos acima, a tabela 2 apresenta as energias firme e média simuladas para a UHE Garibaldi, conforme a configuração apresentada na tabela 1, levando em conta dois casos de indisponibilidade - Bracier e zero - e duas considerações de patamares de carga: dois patamares (com três horas de ponta) e um patamar (neste caso, faz-se o MSUI operar com 24 horas de ponta). A tabela 2 também apresenta as perdas médias (constante  $\Delta h_{med}$  para a simulação “perda constante”, ou média do período histórico para a simulação “perda variável”) e as diferenças de energia média e firme quando se varia apenas a indisponibilidade ou o número de patamares (mantendo-se iguais os demais parâmetros).

Uma análise da tabela 2 permite concluir o que segue. Pelo fato de considerar perda hidráulica em dois patamares, a simulação “perda variável” apresenta efetivamente uma perda energética maior na passagem de um para três patamares (diferenças entre 0,29 e 0,49 MW médios, contra diferenças entre 0,11 e 0,16 MW médios para o caso da simulação “perda constante”). Por outro lado, como o critério “perda constante” leva em conta a vazão sem indisponibilidade no cálculo da perda e o critério “perda variável” não, era de se esperar que as energias médias e firmes calculadas a partir da simulação “perda constante” sofressem menos perdas energéticas por indisponibilidade que as correspondentes da simulação “perda variável”. Isto, entretanto, não se verificou: as perdas por indisponibilidade variaram entre 3,12 e 2,19 MW médios para a simulação “perda constante”, e entre 2,86 e 1,86 MW médios para a simulação “perda variável”.

Tabela 2: Resultados para a UHE Garibaldi variando indisponibilidade e patamares.

Indisp.	Número de patamares	Critério de simulação	Perda média (m)	Energias (MW médios)		Energia "1 patamar" – Energia "3 patamar" (MW médios)		Energia "Indisp=0" – Energia "Bracier" (MW médios)	
				média	firme	média	firme	média	firme
Bracier	2	perda constante	0,88	89,45	79,34	0,11	0,12	3,08	2,19
	2	perda variável	0,91	89,78	79,63	0,29	0,33	2,69	1,86
	1	perda constante	0,88	89,56	79,46			3,12	2,23
	1	perda variável	0,82	90,07	79,96			2,86	2,02
Zero	2	perda constante	0,90	92,53	81,53	0,15	0,16		
	2	perda variável	1,07	92,47	81,49	0,46	0,49		
	1	perda constante	0,90	92,68	81,69				
	1	perda variável	0,93	92,93	81,98				

Este efeito ocorre pelos seguintes motivos:

- apesar de as perdas na simulação “perda constante” não levarem em conta a indisponibilidade, esta é considerada nas energias mensais utilizadas na ponderação [4]. Com isto, as perdas constantes se modificam para as simulações com e sem indisponibilidade, distorcendo o resultado para a simulação inteira;
- o truncamento da vazão máxima para produção de energia (equação 2) e, especificamente neste caso, a diminuição de vazão turbinada por efeito de gerador (ver próximo item) influenciam significativamente no resultado final.

### 3.3 Análise das vazões defluentes próximas da máxima turbinável

Esta seção analisa o modo como as vazões defluentes altas (próximas ou maiores que a máxima turbinável) se comportam nas simulações com as duas versões do modelo. O motivo desta análise é que se mostrou que as vazões altas são responsáveis por parte significativa da diferença entre os resultados entre as simulações “perda constante” e “perda variável”. Importante ressaltar que a utilização de uma usina a fio d’água (configuração levada em conta para UHE Garibaldi) simplifica o estudo, já que, neste caso, as vazões afluentes e defluentes são praticamente iguais, a menos da evaporação e dos usos consuntivos.

A vazão máxima para produção de energia,  $Q_{MAXindisp}$ , é dada como uma função de  $Q_{MAX}$ , a vazão máxima para produção de ponta ( $m^3/s$ ), conforme a fórmula (2). Esta última, por sua vez [5], é dada pela equação 4.

$$Q_{MAX} = \min(Q_{GEN}, Q_{TU}) \quad (4)$$

Onde  $Q_{TU}$  é a vazão máxima devido à limitação das turbinas ( $m^3/s$ ) e  $Q_{GEN}$  é a vazão máxima devido à limitação do gerador ( $m^3/s$ ). Estas grandezas são dadas respectivamente pelas equações 5 e 6.

$$Q_{TU} = \left(\frac{h_m}{h_{ref}}\right)^{BETA} \times Q_{TURB} \quad (5)$$

$$Q_{GEN} = \frac{CAP}{0,00981 \times h_m \times \eta} \quad (6)$$

onde:

$h_m$ : queda líquida  $h_m$  (m) em determinado período (ou mês)  $m$  da simulação;

$h_{ref}$ : queda de referência (m);

$Q_{TURB}$ : vazão máxima ( $m^3/s$ ) das turbinas quando a queda líquida for  $h_{ref}$ ;

$BETA$ : expoente para cada tipo de turbina. Usualmente assume o valor 0,2 para máquinas Kaplan e Bulbo, e 0,5 para máquinas Francis e Pelton;

$\eta$ : rendimento do conjunto turbina-gerador;

$CAP$ : capacidade efetiva de ponta dos geradores (MW), dada pela equação 7.

$$CAP = 0,00981 \times \eta \times h_{ref} \times Q_{TURB} \quad (7)$$

As equações de 4 a 7 valem para as duas versões do MSUI estudadas neste artigo. Uma análise algébrica mostra que, para a condição de referência (queda líquida igual a  $h_{ref}$  e vazão de engolimento igual a  $Q_{TURB}$ ), as equações de 5 a 7 são equivalentes. Outro aspecto importante a ser ressaltado é que, sempre que  $h_m > h_{ref}$ , a vazão máxima para produção em ponta  $Q_{MAX}$  é limitada pelo gerador (equação 6) e, sempre que  $h_m < h_{ref}$  a vazão máxima para produção em ponta  $Q_{MAX}$  é limitada pela turbina (equação 5).

Sejam  $\Delta h_{m,var}$  e  $h_{m,var}$  respectivamente a perda hidráulica e a queda líquida num determinado mês  $m$  para a simulação “perda variável” e  $\Delta h_{m,cte}$  e  $h_{m,cte}$  os respectivos parâmetros para a simulação “perda constante”. Se a vazão defluente for superior àquela em que ocorre a perda média ponderada da simulação “perda constante” tem-se que  $\Delta h_{m,var} > \Delta h_{m,cte}$  e, conseqüentemente, a equação 8.

$$h_{m,var} < h_{m,cte} \quad (8)$$

A partir do exposto, considerem-se duas condições extremas para vazões defluentes altas. Em uma **condição extrema a**, em que  $h_m < h_{ref}$ , para  $m = 1, \dots, n_{per}$ ,  $Q_{MAX}$  seria limitada pela turbina (equação 5) para todo o período da simulação. Neste caso, as vazões  $Q_{MAX}$  e as suas respectivas quedas líquidas para a simulação “perda variável” são menores que as suas correspondentes numa simulação “perda constante”. Como as quedas líquidas e as vazões máximas são menores, as energias geradas nestes

pontos também são menores. Em uma **condição extrema b**, em que  $h_{l_m} > h_{ref}$ , para  $m = 1, \dots, n_{per}$ ,  $Q_{MAX}$  seria limitada pelo gerador (equação 6) para todo o período da simulação. Neste caso, as vazões  $Q_{MAX}$  para a simulação “perda constante” são menores que aquelas da simulação “perda variável”. Por outro lado, não se pode garantir que as energias geradas também sejam menores, já que neste caso as quedas líquidas do caso “perda constante” são maiores que as quedas líquidas do caso “perda variável” (equação 8). Criaram-se então três cenários para simulações considerando: duas condições extremas de queda de referência (**a** e **b**); outra para a condição **original** de queda de referência (igual a 41,9 m, conforme tabela 1). Dentro das condições da UHE Garibaldi, escolheu-se a queda de referência de 45,0 m para a condição extrema **a**, e 40,5 m

para a condição extrema **b**. Consideraram-se dois patamares de carga (com três horas de ponta) e indisponibilidade de Bracier para todos os casos. A partir do exposto, a tabela 3 apresenta os seguintes resultados: energias médias e firmes; diferenças de energias entre simulações “perda constante” e “perda variável” (mantendo-se os demais parâmetros iguais); perdas hidráulicas médias (constante  $\Delta h_{med}$  para a simulação “perda constante”, ou média do período histórico para a simulação “perda variável”).

Já os gráficos central e à direita da figura 2, dada a semelhança de formato entre eles, mostram a importância das vazões turbinadas no resultado das energias.

Tabela 3: Resultado da comparação entre simulações “perda constante” e “perda variável”.

Cenário	Critério	Queda de referência – $h_{ref}$ (m)	Perda média (m)	Energias (MW médios)		Energia “perda constante” – Energia “perda variável” (MW médios)	
				média	firme	média	firme
<b>a</b>	perda constante	45,0	0,80	87,75	78,18	0,18	0,09
	perda variável		0,80	87,57	78,09		
<b>b</b>	perda constante	40,5	0,88	89,46	79,34	-0,36	-0,29
	perda variável		0,91	89,82	79,63		
<b>original</b>	perda constante	41,9	0,88	89,45	79,34	-0,33	-0,29
	perda variável		0,91	89,78	79,63		

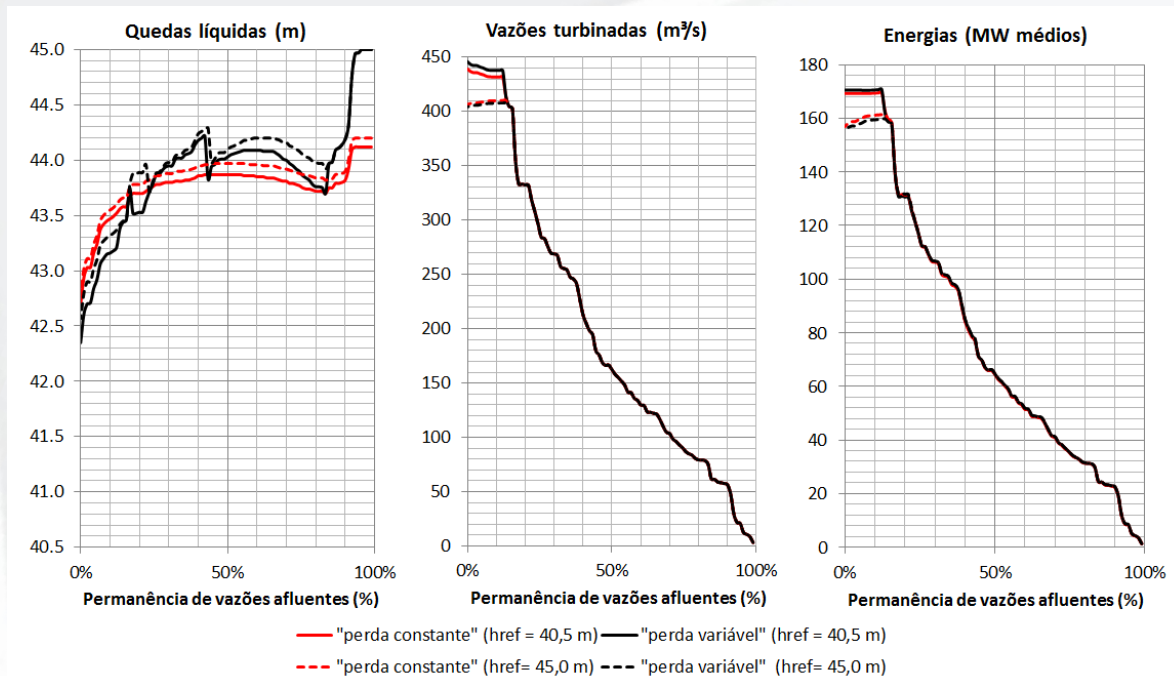


Figura 2: Quedas líquidas (m), vazões turbinadas ( $m^3/s$ ) e energias (MW médios) no período crítico em função da permanência de vazões afluentes ( $m^3/s$ ).

Além disso, estes gráficos mostram como as vazões afluentes altas (com permanências acima de 20%) são importantes na diferença de resultados de energia entre as simulações “perda variável” e “perda constante”, já que é apenas nesta região que as curvas em preto e vermelho se “descolam”. Para as linhas tracejadas ( $h_{ref} = 45,0$  m), o efeito de turbina (equação 5) faz com que as energias da simulação “perda constante” sejam maiores; já para as linhas cheias ( $h_{ref} = 40,5$  m) o efeito de gerador (equação 6) é predominante, fazendo com que a tendência se inverta. As energias nesta região acabam influenciando decisivamente nas diferenças de energias média e firme, que foram apresentadas na tabela 3. Para quedas de referência intermediária, os resultados entre as duas simulações devem se aproximar.

#### 4 Conclusões

O artigo analisou dois tipos de simulação energética conforme a consideração de perdas de carga: “perda constante” e “perda variável”. As diferenças energéticas de energia firme entre os dois critérios resultou pequena, mas duas tendências distintas foram encontradas:

- Para quedas de referência relativamente altas em relação às quedas líquidas, a simulação “perda constante” tende a apresentar energias firmes maiores que aquelas calculadas com perdas variáveis com a simulação “perda variável”.
- Para quedas de referência relativamente baixas, esta tendência se inverte.

O artigo também avaliou o modo como as simulações “perda constante” e “perda variável” levam em conta os patamares de carga diários na simulação e o efeito da indisponibilidade nas perdas hidráulicas para condição de vazões defluentes altas, maiores ou próximas da vazão máxima de engolimento.

O modelo de simulação considerado é o MSUI, da Eletrobras.

#### 5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao engenheiro Marcos Libert Westphalen pelas análises teóricas.

#### Referências

- [1] CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Regras de Comercialização – Garantia Física – Versão 2013.1.0. São Paulo – SP, 56 p.
- [2] MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2008) - Portaria MME n. 101, de 23 de março de 2016.
- [3] MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2008) - Portaria MME n. 258, de 28 de julho de 2008.
- [4] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (2012) - Metodologia de Cálculo de Parâmetros Energéticos Médios: Rendimento e Perda Hidráulica - Rio de Janeiro – RJ, 20 p.

- [5] ELETROBRAS (2014) – MSUI - Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas – Manual de Metodologia – Versão 3.3 – Rio de Janeiro, RJ, Metodologia de Cálculo de Parâmetros Energéticos Médios: Rendimento e Perda Hidráulica - Rio de Janeiro – RJ, 27 p.
- [6] MÜLLER, F; BERTOL, R. E. (2014) – Análise de perdas de carga no MSUI. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens. Ano I, no 1. Rio de Janeiro – RJ – pp. 8-13.
- [7] MÜLLER, F; BERTOL, R. E. (2013) - Análise da indisponibilidade no MSUI 1. Relação entre vazão máxima turbinada e vazão média afluente. Anais XX Simpósio Brasileiro Recursos, Bento Gonçalves, RS.
- [8] MÜLLER, F; BERTOL, R. E. (2013) - Análise da indisponibilidade no MSUI 2. Permanência de vazões afluentes. Anais XX Simpósio Brasileiro Recursos, Bento Gonçalves, RS.