

ANÁLISE DA INDISPONIBILIDADE NO MSUI 2. PERMANÊNCIA DE VAZÕES AFLUENTES

Fabricio Muller¹; Roberto Eugenio Bertol²*

Resumo – A indisponibilidade, para o MSUI, atua somente nas vazões afluentes maiores ou próximas da máxima turbinada. Isto faz com que a indisponibilidade declarada na entrada de dados do MSUI, de maneira geral, seja maior do que a perda energética efetiva por indisponibilidade. No artigo é analisada a relação entre a probabilidade de a vazão afluente ser maior que a vazão máxima turbinada com a perda efetiva por indisponibilidade. Também é apresentada uma fórmula indicativa do cálculo de energia firme.

Palavras-Chave – MSUI, INDISPONIBILIDADE, ENERGIA

ANALYSIS OF THE UNAVAILABILITY IN THE MSUI MODEL

Abstract – The unavailability in the MSUI model acts only in larger than or near to the maximum turbinable flows. This causes the unavailability declared in the MSUI data entry, in general, be greater than the effective energy loss due to unavailability. The article analyzes the relationship between the probability of the inflow being greater than the maximum turbinable flow with the effective energy loss due to the unavailability. Furthermore, it is also presented an indicative formula for calculating firm energy.

Keywords – MSUI, UNAVAILABILITY, ENERGY

INTRODUÇÃO

O modelo MSUI, em sua versão 3.2, é o modelo oficial de cálculo de energia firme para o Sistema Elétrico Brasileiro (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2008). A energia firme é calculada como a média do período crítico do Sistema Interligado Nacional, que vai de junho de 1949 a novembro de 1956. Já a energia média é a média gerada no período histórico, que deve se iniciar em janeiro de 1931 para as UHEs no Brasil. A indisponibilidade, para o MSUI, atua somente nas vazões afluentes maiores ou próximas da máxima turbinada. Isto faz com que a indisponibilidade declarada na entrada de dados do MSUI, de maneira geral, seja maior do que a perda energética efetiva – ou real – por indisponibilidade.

Em um primeiro artigo (Müller e Bertol, 2013), os autores fizeram uma análise da indisponibilidade no MSUI que possibilitou apresentar uma relação entre a perda de energia efetiva por indisponibilidade e uma variável, dada pela relação entre vazão máxima turbinada e vazão média afluente, que poderia ser utilizada de maneira expedita. Neste segundo artigo o tema é aprofundado e a análise se concentra na relação entre perda efetiva por indisponibilidade com a probabilidade de a vazão afluente ser maior que a vazão máxima turbinada. Além disso, é apresentada uma fórmula indicativa para o cálculo de energia firme.

¹ Engenheiro civil, Intertechne Consultores S.A., e-mail: fm@intertechne.com.br

* Autor responsável pela submissão.

² Superintendente de Estudos Básicos, Intertechne Consultores S.A., e-mail: reb@intertechne.com.br

FORMULAÇÃO

Conforme Müller e Bertol (2013), nas simulações com o MSUI a indisponibilidade é, por *default*, calculada pela Tabela de Bracier, que apresenta índices de indisponibilidade forçada (TEIF) e indisponibilidade programada (IP) em função da potência unitária, apresentados na Tabela 1. Esta tabela também apresenta a indisponibilidade total, dada por $1 - ((1 - \text{TEIF}) \times (1 - \text{IP}))$, e o fator de capacidade máximo contínuo FCMAX, dado por $(1 - \text{TEIF}) \times (1 - \text{IP})$, conforme a notação apresentada em ELETROBRAS (2009).

Tabela 1 – Valores de indisponibilidade recomendados pelo BRACIER

Potência unitária (MW)	TEIF (p.u.)	IP (p.u.)	Total (p.u.)	FCMAX (p.u.)
10 – 29	0,02333	0,06861	0,09034	0,90966
30 – 59	0,01672	0,05403	0,06985	0,93015
60 – 199	0,02533	0,08091	0,10419	0,89581
200 – 499	0,02917	0,12122	0,14683	0,85317

Na simulação com o MSUI a indisponibilidade atua como uma diminuição na vazão máxima turbinável (ELETROBRAS, 2009), desta forma ela tem efeito somente nas vazões afluentes maiores ou próximas da vazão máxima de engolimento. Neste caso, portanto, o valor da vazão máxima turbinável considerando a indisponibilidade de Bracier ($Q_{max\ turb\ ind=Bracier}$) passa a ser:

$$Q_{max\ turb\ ind=Bracier} = Q_{max\ turb} \times \text{FCMAX} \quad (1)$$

onde $Q_{max\ turb}$ é a vazão máxima turbinável real do aproveitamento.

Já a produtibilidade K é um coeficiente que, multiplicado pela vazão turbinada em m^3/s , dá a energia em MW médios:

$$K = \frac{9,81 \cdot hl \cdot \eta}{1000} \quad (2)$$

Em que hl é queda líquida em metros e η é o rendimento (p.u.). Como o MSUI considera um rendimento constante na simulação, o valor da produtibilidade K varia mês a mês, proporcional à variação da queda líquida (a produtibilidade é uma grandeza que consta dos arquivos de saída do MSUI).

Para facilitar a compreensão da relação entre a perda energética efetiva por indisponibilidade e a probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinada, será considerada inicialmente a simplificação de que K (e, por consequência, a queda líquida) é constante. Supondo ainda, do mesmo modo que em Müller e Bertol (2013), que não há perdas por desvios de água e evaporação, nem regularização por cascata, pode-se definir a energia média simplificada sem consideração de indisponibilidade ($EMS_{indisponibilidade=zero}$) como:

$$EMS_{indisponibilidade=zero} = K \cdot Q_{max\ turb} \cdot P[Q > Q_{max\ turb}] + K \cdot \bar{Q}_{Q < Q_{max\ turb}} \cdot (1 - P[Q > Q_{max\ turb}]) \quad (3)$$

onde Q = vazão afluente para todo o período histórico em m^3/s ;

$P[Q > Q_{max\ turb}]$ = probabilidade de que a vazão afluente Q seja maior que $Q_{max\ turb}$;

$\bar{Q}_{Q < Q_{max\ turb}}$ = média das vazões afluentes menores que $Q_{max\ turb}$.

Do mesmo modo, pode-se definir a energia média simplificada com consideração de indisponibilidade Bracier ($EMS_{indisponibilidade=Bracier}$) como:

$$EMS_{\text{indisponibilidade=Bracier}} = K \cdot Q_{\text{max turb}_{\text{ind=Bracier}}} \cdot P[Q > Q_{\text{max turb}_{\text{ind=Bracier}}}] + K \cdot \bar{Q}_{Q < Q_{\text{max turb}_{\text{ind=Bracier}}}} \cdot (1 - P[Q > Q_{\text{max turb}_{\text{ind=Bracier}}}] \quad (4)$$

onde $\bar{Q}_{Q < Q_{\text{max turb}_{\text{ind=Bracier}}}}$ é a média das vazões afluentes menores que $Q_{\text{max turb}_{\text{ind=Bracier}}}$.

A relação entre vazões afluentes e vazões turbinadas com e sem indisponibilidade é exemplificada na Figura 1.

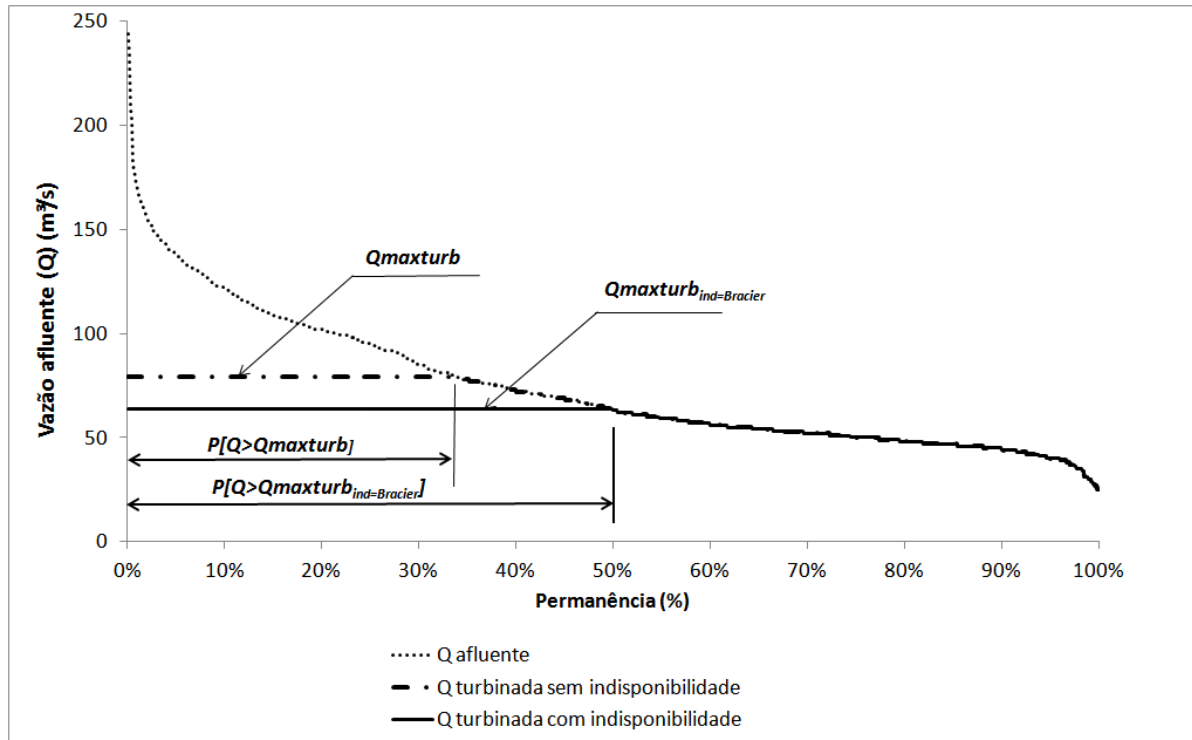


Figura 1 – Exemplo de vazões afluentes e turbinadas, com e sem consideração de indisponibilidade

Na Figura 1, a vazão média turbinada para o caso sem indisponibilidade é a média de vazões abaixo da linha com traço-e-ponto; já a vazão média turbinada para o caso com indisponibilidade é a média de vazões abaixo da linha cheia. Quando se considera $K =$ constante, a multiplicação de K vezes a média turbinada para o período histórico dá a energia média.

Considerando a notação apresentada em Müller e Bertol (2013), pode-se definir a perda efetiva de energia média simplificada por indisponibilidade $PEEIS_{\text{média}}$ como:

$$PEEIS_{\text{média}} = 1 - \frac{EMS_{\text{indisponibilidade=Bracier}}}{EMS_{\text{indisponibilidade=zero}}} \quad (5)$$

De maneira semelhante ao caso da energia média, a equação da energia firme simplificada sem consideração de indisponibilidade ($EFS_{\text{indisponibilidade=zero}}$) pode ser escrita como:

$$EFS_{\text{indisponibilidade=zero}} = K \cdot Q_{\text{max turb}} \cdot P[Q_{\text{crit}} > Q_{\text{max turb}}] + K \cdot \bar{Q}_{Q_{\text{crit}} < Q_{\text{max turb}}} \cdot (1 - P[Q_{\text{crit}} > Q_{\text{max turb}}]) \quad (6)$$

onde Q_{crit} = vazão afluente para o período crítico em m³/s (jun/49 a nov/56);

$P[Q_{crit} > Q_{maxturb}]$ = probabilidade de que a vazão afluente no período crítico Q_{crit} seja maior que $Q_{maxturb}$;

$\bar{Q}_{crit_{Q < Q_{maxturb}}}$ = média das vazões afluentes menores que $Q_{maxturb}$ no período crítico.

A equação da energia firme simplificada com indisponibilidade de Bracier é a seguinte:

$$EFS_{indisponibilidade=Bracier} = K \cdot Q_{maxturb_{ind=Bracier}} \cdot P[Q_{crit} > Q_{maxturb_{ind=Bracier}}] + K \cdot \bar{Q}_{crit_{Q_{crit} < Q_{maxturb_{ind=Bracier}}}} \cdot (1 - P[Q_{crit} > Q_{maxturb_{ind=Bracier}}]) \quad (7)$$

onde $\bar{Q}_{Q_{crit} < Q_{maxturb_{ind=Bracier}}}$ é a média das vazões afluentes no período crítico menores que $Q_{maxturb_{ind=Bracier}} \cdot PEEIS_{firme}$, que é a perda efetiva de energia firme simplificada por indisponibilidade resulta:

$$PEEIS_{firme} = 1 - \frac{EFS_{indisponibilidade=Bracier}}{EFS_{indisponibilidade=zero}} \quad (8)$$

Do mesmo modo que em Müller e Bertol, pode-se calcular a relação de indisponibilidade simplificada RIS , que é a relação entre a perda efetiva de energia dividida pela indisponibilidade de Bracier. No presente caso, tem-se, para a energia firme simplificada,

$$RIS_{firme} = \frac{PEEIS_{firme}}{Indisponibilidade\ Bracier} \quad (9)$$

e, para a energia média simplificada,

$$RIS_{média} = \frac{PEEIS_{média}}{Indisponibilidade\ Bracier} \quad (10)$$

ADEQUAÇÃO DAS EQUAÇÕES APRESENTADAS AO CASO DE QUEDA CONSTANTE

Do mesmo modo que em Müller e Bertol (2013), considerou-se 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 Caldeirão³, para os estudos de caso neste trabalho. Este *deck* é o mais recente obtido no *site* da EPE (www.epe.gov.br) quando da elaboração deste artigo. Para exemplificar a aplicação da metodologia apresentada acima, escolheu-se a UHE Jauru para a apresentação de uma análise detalhada.

A partir dos dados do *deck* de Cachoeira Caldeirão, foi feita uma simulação com o MSUI de modo que todas as usinas passassem a operar com queda líquida constante, igual à queda de referência. No caso específico de Jauru isto foi feito a partir dos seguintes passos:

- O polinômio cota volume passou a ser o seguinte:

$$Cota = 355 + 0 \cdot (vol) + 0 \cdot (vol)^2 + 0 \cdot (vol)^3 + 0 \cdot (vol)^4 \quad (11)$$

³ Endereço eletrônico <http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202012/Leil%C3%A3oA-52012Nteconjuntodearquivosdetalham%C3%A1lculodagarantiaf%C3%ADsicadaUHECachoeiraCaldeir%C3%A3o.a.spx>, acessado em 15 de abril de 2013.

Onde a *cota* está em metros e o volume do reservatório *vol* está em hm³. Utilizando o polinômio desta forma garante que a cota de montante seja constante igual ao nível máximo operacional da UHE Jauru, que é 355 m.

- Como a perda de Jauru é de 4 metros e a queda de referência correspondente é igual a 102,9 m, o nível de jusante passa a ser constante, igual a $355 - 4 - 102,9 = 248,1$ m. De maneira semelhante à equação (11), o polinômio vazão-nível de jusante passou a ser o seguinte:

$$\text{Nível} = 248,1 + 0.(Q) + 0.(Q)^2 + 0.(Q)^3 + 0.(Q)^4 \quad (12)$$

onde o nível está em metros e a vazão afluente *Q*, em m³/s.

Além desta modificação, eliminaram-se a evaporação e o desvio de água da entrada de dados do MSUI, para concentrar os efeitos energéticos na vazão afluente. Para eliminar os efeitos de cascata, foi feita uma modificação nos arquivos de entrada do MSUI de modo que todas as usinas passassem a operar de maneira isolada (sem usinas a jusante, portanto). Os resultados desta simulação no MSUI para Jauru são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da simulação modificada do MSUI para Jauru (MW médios)

Energia firme		Energia média	
Sem indisponibilidade	Bracier	Sem indisponibilidade	Bracier
80,55	80,15	79,72	79,36

Para aplicação das fórmulas (3), (4), (6) e (7) foram obtidos os seguintes valores para Jauru:

- $\eta = 91,6\%$;
- $K = 9,81 \times 91,6\% \times 102,9 / 1000 = 0,9247$
- Potência instalada = 118 MW (3 unidades); FCMAX = 0,93015
- $Q_{max\ turb} = 127,6$ m³/s e $Q_{max\ turb\ ind=Bracier} = 118,69$ m³/s
- $P[Q > Q_{max\ turb}] = 2,8\%$ e $P[Q > Q_{max\ turb\ ind=Bracier}] = 6,0\%$
- $P[Q_{crit} > Q_{max\ turb}] = 4,4\%$ e $P[Q_{crit} > Q_{max\ turb\ ind=Bracier}] = 7,8\%$
- $\bar{Q}_{Q < Q_{max\ turb}} = 85,01$ m³/s e $\bar{Q}_{Q < Q_{max\ turb\ ind=Bracier}} = 83,71$ m³/s
- $\bar{Q}_{crit\ Q < Q_{max\ turb}} = 85,23$ m³/s e $\bar{Q}_{crit\ Q < Q_{max\ turb\ ind=Bracier}} = 83,98$ m³/s

A aplicação das fórmulas (3), (4), (6) e (7) resultou nas mesmas energias apresentadas na Tabela 2, obtidas com simulação. Este comportamento apresentado pela UHE Jauru acabou sendo semelhante àquele apresentado por praticamente todas as demais usinas do *deck* empregado na simulação.

RELAÇÃO ENTRE INDISPONIBILIDADE E PROBABILIDADE DE QUE A VAZÃO AFLUENTE SEJA MAIOR QUE A MÁXIMA TURBINÁVEL

Do mesmo modo que em Müller e Bertol (2013), pensou-se em estabelecer uma análise relacionando as relações de indisponibilidades entre RI_{firme} e $RI_{média}$ e outra grandeza. RI_{firme} e $RI_{média}$ são calculadas com fórmulas similares às apresentadas nas equações (5), (8), (9) e (10), mas com energias firme e média calculadas pelo MSUI, e não as calculadas pelas fórmulas simplificadas apresentadas anteriormente. Como as equações de energia simplificada levam em conta a

probabilidade de que a vazão afluyente seja maior que a turbinada, pensou-se em estabelecer as seguintes correspondências diretas:

- Entre RI_{firme} e $P[Q_{crit} > Q_{maxturb}]$
- Entre $RI_{média}$ e $P[Q > Q_{maxturb}]$

Nas simulações efetuadas neste sentido, para concentrar os efeitos no efeito da indisponibilidade, do *deck* de garantia física de Cachoeira Caldeirão são retiradas as cascatas (ou seja, todas as usinas operam isoladas), os desvios de água e as evaporações. Foram também retiradas usinas com resultados inesperados (como energia firme maior com indisponibilidade do que sem). Os resultados das simulações para os casos a) e b) são apresentados respectivamente nas Figuras 2 e 3.

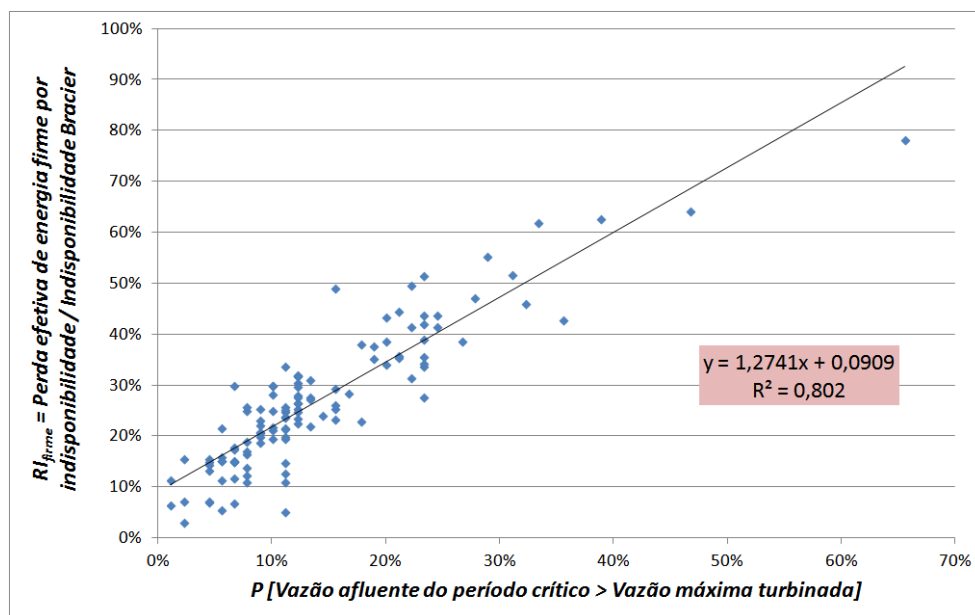


Figura 2 - Relação entre RI_{firme} e $P[Q_{crit} > Q_{maxturb}]$

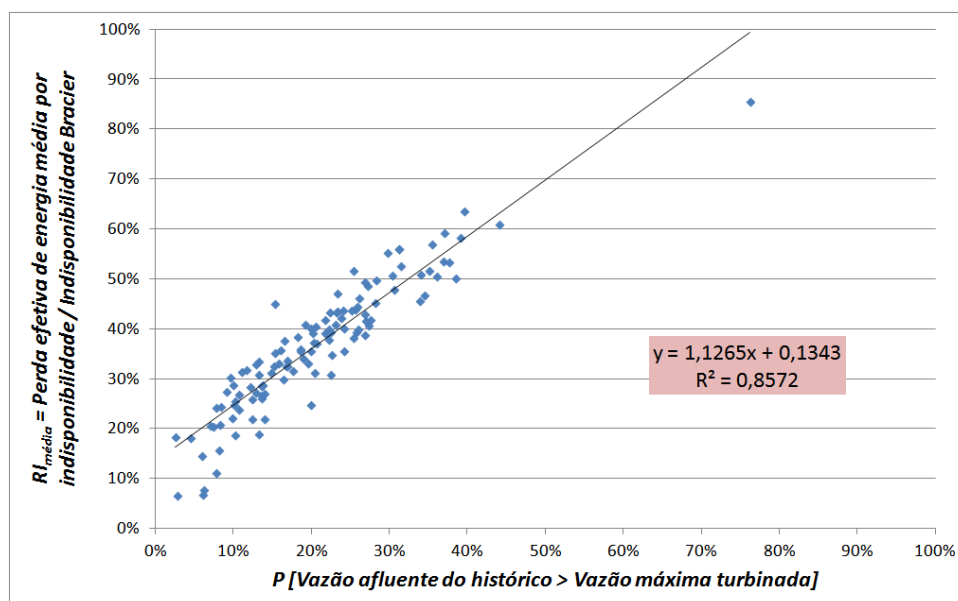


Figura 3 - Relação entre $RI_{média}$ e $P[Q > Q_{maxturb}]$

Das figuras 2 e 3 são obtidas as seguintes relações:

$$RI_{firme} = 0,0909 + 1,2741.P[Q_{crit} > Q_{maxturb}] \quad (13)$$

$$RI_{média} = 0,1343 + 1,1265.P[Q > Q_{maxturb}] \quad (14)$$

Os coeficientes de determinação (r^2) para as fórmulas (13) e (14) são respectivamente 0,8020 e 0,8572. Estes coeficientes resultaram maiores que aqueles apresentados em Müller e Bertol (2013), para a relação dos **RI** com a variável dada pela vazão máxima turbinável dividida pela vazão média afluente. Isto mostra a forte correlação entre a perda efetiva por indisponibilidade e a probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinável, em conformidade com os resultados e equações apresentados anteriormente.

O uso dos gráficos acima facilita a avaliação expedita das perdas efetivas por indisponibilidade. Por exemplo, para uma $P[Q > Q_{maxturb}]$ correspondente a 25%, parâmetro normalmente utilizado pela ANEEL para analisar se a motorização da usina está adequada, o valor da indisponibilidade real da usina corresponde a aproximadamente 40% do valor de indisponibilidade apresentada na tabela da BRACIER

A vantagem da relação apresentada em Müller e Bertol (2013), por outro lado, está na maior facilidade de utilização expedita da variável vazão máxima turbinável dividida pela vazão média afluente, sem necessitar de dispor da curva de permanência de vazões médias mensais.

ANÁLISE DO CÁLCULO DE ENERGIA FIRME SIMPLIFICADA

As fórmulas de energias simplificadas (3), (4), (6) e (7) levam em conta casos especiais (**K** constante, sem evaporação e desvio de água, para usinas isoladas). O interesse aqui, a partir dos resultados apresentados, é em verificar a adequação das equações apresentadas para casos de simulação real.

Para isto, compararam-se os resultados da equação (7) - que é a que apresenta o resultado mais importante na prática, o da energia firme com Bracier - com aqueles obtidos em uma simulação com o MSUI. O *deck* para esta simulação é o mesmo *deck* da EPE para Cachoeira Caldeirão, com apenas uma modificação: para igualar os aproveitamentos quanto à indisponibilidade, inseriram-se os valores de Bracier mesmo para as usinas (como Belo Monte, por exemplo) que têm indisponibilidades diferentes (ou seja, neste caso a simulação com o MSUI é praticamente igual à do *deck* original). Para a aplicação da fórmula (7) o valor de **K** (fórmula 2) é calculado com **hl** = queda de referência. O resultado desta comparação é apresentado na Figura 4.

Uma análise da Figura 4 mostra que se pode obter a uma aproximação da energia firme calculada no MSUI com indisponibilidade Bracier ($EF_{indisponibilidade=Bracier}$) através da fórmula:

$$EF_{indisponibilidade=Bracier} = 1,0355 EFS_{indisponibilidade=Bracier} \quad (15)$$

com um ajuste (r^2) alto, igual a 0,9978. A vantagem desta fórmula é que, com ela, é possível se obter uma estimativa inicial da energia firme utilizando apenas alguns dos dados de entrada: série de vazões afluentes, rendimento, queda de referência e vazão máxima turbinada.

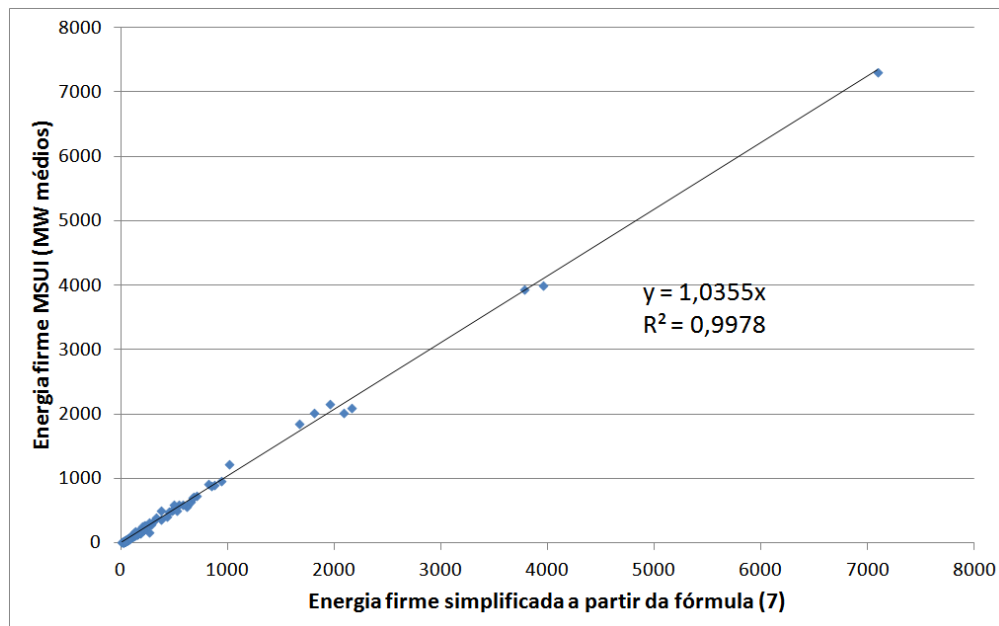


Figura 4 – Energias firmes com indisponibilidade Bracier: comparação entre o resultado da simulação com o MSUI com o da fórmula (7)

CONCLUSÃO

O estudo propõe uma fórmula empírica para converter o valor de indisponibilidade apresentada na tabela do Bracier para um valor de indisponibilidade efetiva a ser aplicada sobre a energia média ou firme utilizando apenas o percentual de vazões acima da máxima turbinada, isto permite uma visão imediata de como os valores de indisponibilidade expostos na tabela do Bracier afetam as energias na simulação com MSUI.

A relação entre as variáveis perda efetiva por indisponibilidade no MSUI e probabilidade de que a vazão afluente seja maior que a máxima turbinável mostrou-se bastante robusta nos testes realizados

O estudo apresenta também uma fórmula para cálculo da energia sem uso do MSUI, permitindo cálculos iniciais de forma mais expedita, com excelente coeficiente de correlação.

Dada a aplicação prática da análise apresentada, espera-se que os resultados mostrados neste artigo levem a estudos posteriores mais aprofundados.

REFERÊNCIAS

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (2008). Portaria MME n. 258, de 28 de julho de 2008.

ELETROBRAS (2009). *MSUI (Modelo de simulação a usinas individualizadas), versão 3.2. Manual de metodologia*. Rio de Janeiro - RJ, 27 p.

MÜLLER, F; BERTOL, R. E. (2000). Análise da indisponibilidade no MSUI 1. Relação entre vazão máxima turbinada e vazão média afluente. Artigo enviado para apreciação ao XX Simpósio Brasileiro Recursos Hídricos do Nordeste, Bento Gonçalves, Nov. 2013.