

## **ANÁLISE DA INDISPONIBILIDADE NO MSUI 1. RELAÇÃO ENTRE VAZÃO MÁXIMA TURBINADA E VAZÃO MÉDIA AFLUENTE**

*Fabricio Muller<sup>1</sup> \* ; Roberto Eugenio Bertol<sup>3</sup>*

**Resumo** – O Modelo MSUI (Modelo de Simulação a Usinas Individualizadas), oficial para o cálculo de energias firmes no Setor Elétrico Brasileiro (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2008), utiliza a Tabela de Bracier para o cálculo das indisponibilidades forçada e programada. O MSUI desconta a indisponibilidade na simulação energética apenas quando a vazão afluyente é maior que vazão máxima turbinada. Por outro lado, muitas vezes é importante verificar qual o impacto real do desconto da indisponibilidade em termos de perdas de energia média ou firme. Este trabalho mostra que uma variável dada pela relação entre vazão máxima turbinada e vazão média afluyente dá uma boa indicação da perda efetiva por indisponibilidade numa simulação com o MSUI.

**Palavras-Chave** – MSUI, INDISPONIBILIDADE, ENERGIA

### **ANALYSIS OF THE UNAVAILABILITY IN THE MSUI MODEL**

**Abstract** – MSUI (Simulation Model to Individualized Plants), the official model for calculating firm energy in the Brazilian Electrical Sector, uses Bracier Table to calculate the forced and scheduled outages. The MSUI discounts the unavailability only when the inflow is greater than maximum turbinable flow. Moreover, it is frequently important to check which is the real impact of the unavailability discount in terms of firm or mean energy losses. This work shows that a variable given by mean affluent flow and maximum turbinable flow gives a good indication of the actual loss by unavailability in a MSUI simulation.

**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 se inicia no ano de 1931 para as UHEs no Sistema Interligado Nacional.

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.

O objetivo deste artigo é apresentar uma relação que apresente um indicativo da perda efetiva de energia em uma usina em função de dados básicos de entrada dos estudos energéticos. A partir

---

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

\* Autor responsável pela submissão.

<sup>3</sup> Superintendente de Estudos Básicos, Intertechne Consultores S.A, e-mail: reb@intertechne.com.br

disto, o estudo não só visa apresentar uma análise do comportamento da indisponibilidade no MSUI, como também apresentar uma relação da perda de energia efetiva por indisponibilidade que possa ser utilizada de maneira expedita.

## A INDISPONIBILIDADE NO MSUI

Nas simulações com o MSUI no Sistema Brasileiro (por exemplo, para os leilões de energia dos aproveitamentos hidrelétricos realizados pela ANEEL - como em EPE, 2011) a indisponibilidade é 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 TEIF e IP 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 energética com o MSUI, a indisponibilidade atua como uma diminuição na vazão máxima turbinada (ELETROBRAS, 2009): ela, portanto, atua somente nas vazões afluentes maiores ou próximas da vazão máxima de engolimento. Isto é exemplificado pela Figura 1, que mostra as energias simuladas no MSUI na usina de Itiquira I para o período crítico, com e sem consideração de perda por indisponibilidade. Os dados de Itiquira I foram obtidos no *deck* (conjunto de arquivos com dados básicos para simulação energética) do MSUI referente ao Leilão A-5/2012, para o cálculo da garantia física da UHE Cachoeira Caldeirão<sup>4</sup>. Este *deck* é o mais recente obtido no *site* da EPE quando da elaboração deste trabalho.

Uma análise da Figura 1 mostra que apenas acima de certo limite, referente à vazão máxima turbinada vezes FCMAX, há uma diferenciação entre as energias simuladas no MSUI com e sem indisponibilidade.

Para o caso de Itiquira I, que tem uma potência unitária de 30,40 MW e duas máquinas instaladas, o índice de indisponibilidade de Bracier refere-se à faixa unitária de 30 a 59 MW, para o qual o valor de indisponibilidade total é igual a 0,06958 (ver Tabela 1). A energia firme correspondente é igual a 43,15 MW médios. Quando se calcula o mesmo aproveitamento sem perda por indisponibilidade, por outro lado, a energia firme passa a 44,19 MW médios. A perda efetiva por indisponibilidade (**PEEI**), portanto, é igual a  $1 - 43,15/44,19 = 0,0235$ , menor que o valor da Bracier.

Em estudos de aproveitamentos hidrelétricos, frequentemente há interesse em saber a perda efetiva de energia firme por indisponibilidade, e o objetivo deste trabalho é apresentar um critério simples que seja indicativo desta perda. Deve-se, portanto, calcular uma relação de indisponibilidade **RI** tal que

<sup>4</sup> Endereço eletrônico <http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20A-5%202012/Leil%C3%A3oA-52012Nteconjuntodearquivosdetalham%C3%A1liculodagarantiaf%C3%ADsicadaUHECachoeiraCaldeir%C3%A3o.a.spx>, acessado em 15 de abril de 2013.

$$RI = \frac{PEEI}{\text{Indisponibilidade Bracier}} \quad (1)$$

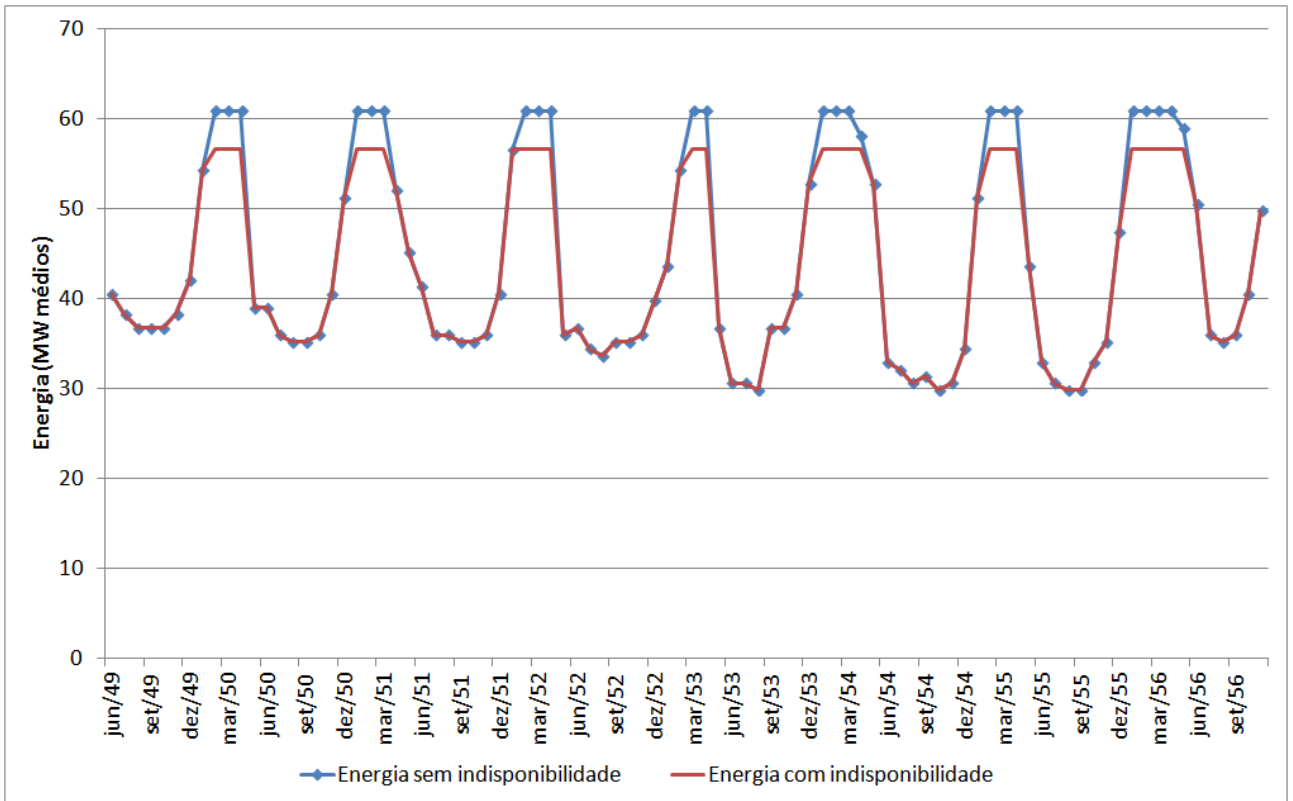


Figura 1 – Energias simuladas no MSUI no período crítico para Itiquira I, com e sem consideração da indisponibilidade

onde  $PEEI$  é a perda energética efetiva por indisponibilidade. No caso de Itiquira I apresentado acima,  $RI$  é igual a  $0,0235/0,06985 = 0,3364$ . Quanto mais próximo de zero for o valor de  $RI$ , menor a perda efetiva de energia por indisponibilidade; quanto mais próximo de 1, mais próxima é a perda efetiva dos valores da Tabela de Bracier.

Dois parâmetros energéticos serão analisados para este trabalho: a energia média (que é a média gerada numa simulação com o período histórico completo, igual a 1931 a 2010 para este estudo) e a energia firme (média gerada na simulação do período crítico do Sistema, que vai de junho de 1949 a novembro de 1956). A partir disto, são calculados dois valores de  $RI$ , para as energias média e firme, dados por:

$$RI_{\text{firme}} = \frac{PEEI_{\text{firme}}}{\text{Indisponibilidade Bracier}} \quad (2)$$

$$RI_{\text{média}} = \frac{PEEI_{\text{média}}}{\text{Indisponibilidade Bracier}} \quad (3)$$

onde  $PEEI_{\text{firme}}$  é a perda energética efetiva de energia firme, e  $PEEI_{\text{média}}$  é a perda energética efetiva de energia média. Conforme já apresentado no exemplo com Itiquira I,  $PEEI_{\text{firme}}$  é obtida em duas simulações com o MSUI, uma com a indisponibilidade de Bracier e outra com indisponibilidade igual a zero, chegando-se na seguinte fórmula:

$$PEEI_{firme} = 1 - \frac{EF_{indisponibilidade=Bracier}}{EF_{indisponibilidade=zero}} \quad (4)$$

Onde  $EF_{indisponibilidade=Bracier}$  é a energia firme obtida considerando a indisponibilidade de Bracier, e  $EF_{indisponibilidade=zero}$  é a energia firme obtida considerando a indisponibilidade igual a zero. De maneira semelhante, calcula-se a  $PEEI_{média}$ .

## ANÁLISES E RESULTADOS

A partir do *deck* do MSUI utilizado no exemplo acima, para Itiquira I, foram feitas análises no sentido de obter os parâmetros básicos das usinas que se ajustassem bem com os valores respectivos de  $RI_{firme}$  e  $RI_{média}$ , tais como:

- o coeficiente de variação das vazões afluentes;
- a sazonalidade (calculada por um estimador dado pela divisão entre a média de vazões afluentes do mês mais chuvoso e a média de vazões afluentes do mês mais seco);
- o fator de capacidade.

Os resultados obtidos, porém, não foram satisfatórios. A melhor variável representativa obtida nestas análises foi dada pela relação entre a vazão média afluente e a vazão máxima turbinada. Se esta relação de vazões for chamada de  $RQ$ , pode-se fazer como no caso da relação  $RI$  e obter um valor de  $RQ$  para energia média ( $RQ_{média}$ ) e outro para a energia firme ( $RQ_{firme}$ ), que são dados por:

$$RQ_{firme} = \frac{\text{Vazão Média Afluente no Período Crítico}}{\text{Vazão máxima turbinada}} \quad (5)$$

$$RQ_{média} = \frac{\text{Vazão Média Afluente no Período Completo}}{\text{Vazão máxima turbinada}} \quad (6)$$

Para explicar a razão desta proporcionalidade entre  $RI$  e  $RQ$ , foi feito um exemplo com Itiquira I, que tem uma vazão máxima turbinada de 79,4 m<sup>3</sup>/s, potência instalada de 60,8 MW e duas unidades. São simuladas duas potências instaladas diferentes para o aproveitamento:

- Vazão máxima turbinável, igual a 55 m<sup>3</sup>/s, e potência instalada igual a 42,06 MW. Para que se caísse na mesma faixa de Bracier original, Itiquira I foi simulada com apenas uma máquina para este caso. A Figura 2 apresenta as energias simuladas correspondentes no MSUI para o período crítico, com e sem consideração de indisponibilidade;
- Vazão máxima turbinável, igual a 125 m<sup>3</sup>/s, e potência instalada igual a 95,60 MW. A Figura 3 apresenta as energias simuladas no MSUI para o período crítico para este caso, com e sem consideração de indisponibilidade.

Uma análise das Figuras 2 e 3 mostra que, quando a vazão máxima turbinável é maior (Figura 3), praticamente toda a vazão afluente é turbinada e há pouca perda efetiva por indisponibilidade. Quando a vazão de engolimento é menor, por outro lado (Figura 2), as vazões afluentes frequentemente são maiores que a máxima de turbinamento, fazendo com que haja maior perda efetiva por indisponibilidade.

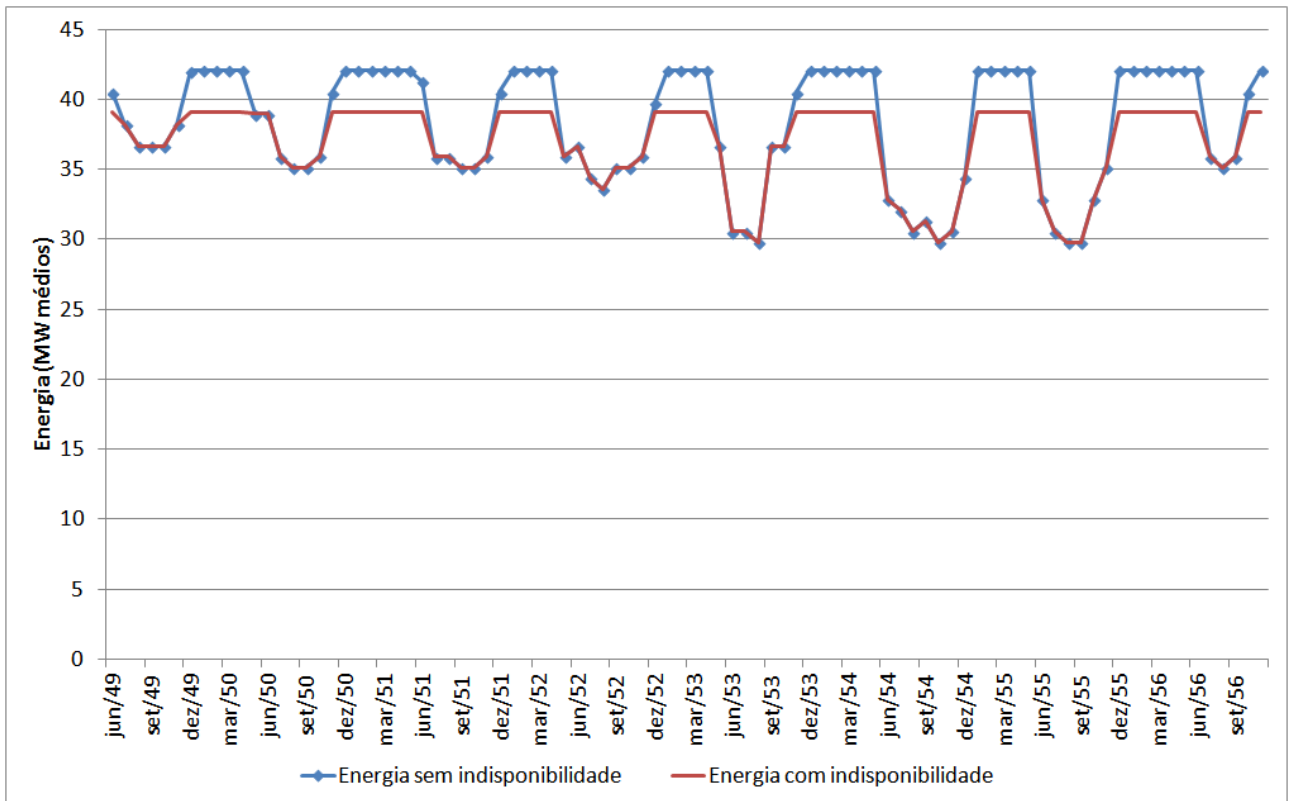


Figura 2 – Energias simuladas no MSUI no período crítico em Itiquira I com vazão máxima turbinada de 55 m<sup>3</sup>/s e potência instalada de 42,06 MW, com e sem consideração da indisponibilidade

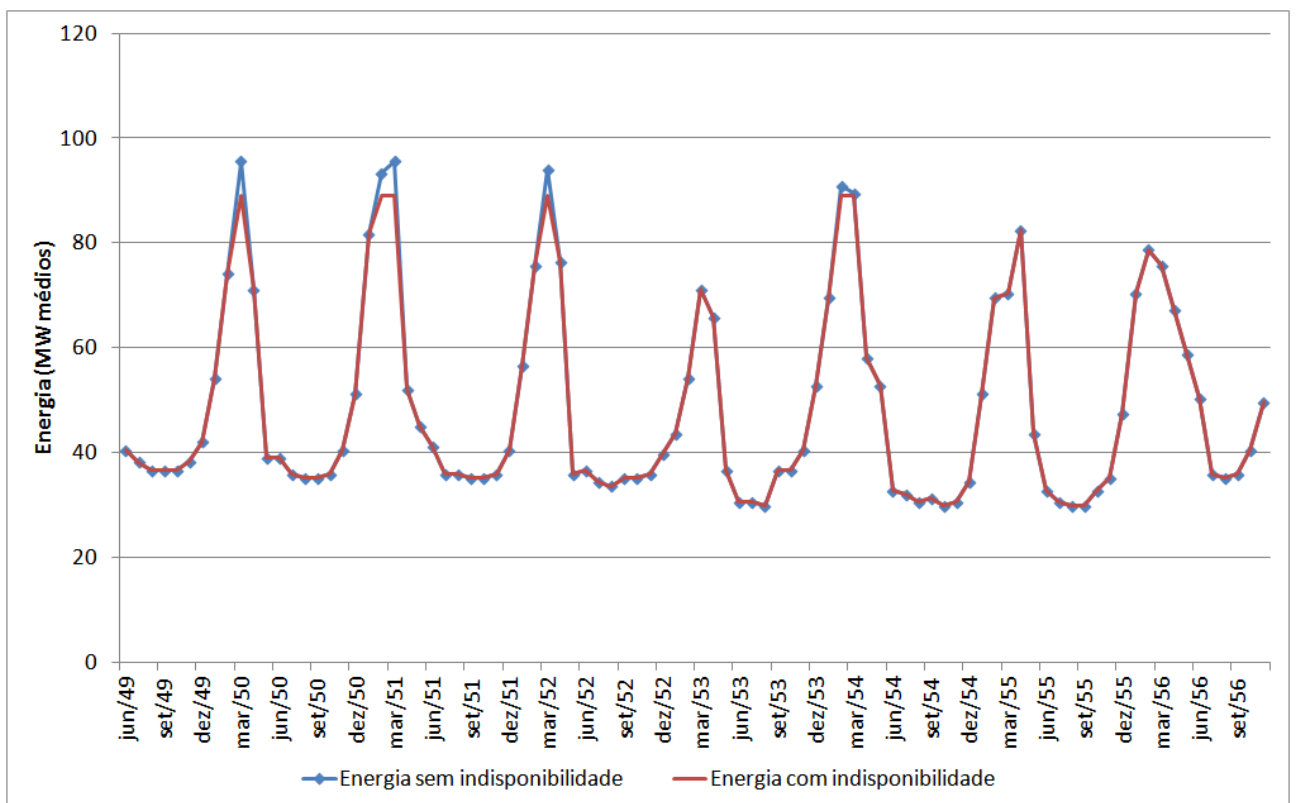


Figura 3 – Energias simuladas no MSUI no período crítico em Itiquira I com vazão máxima turbinada de 125 m<sup>3</sup>/s e potência instalada de 95,60 MW, com e sem consideração da indisponibilidade

A partir do exposto, foram feitas simulações com o objetivo de obter uma relação entre  $RI$  e  $RQ$  considerando o *deck* do MSUI referente ao Leilão A-5/2012 (o mesmo utilizado no exemplo acima para Itiquira I). Para estas simulações foram feitas as seguintes modificações no *deck* original da EPE:

- Como o MSUI pode mudar a decisão de operação em cascatas quando se modificam as indisponibilidades – mascarando, portanto, os efeitos da indisponibilidade na energia gerada -, foram eliminadas as cascatas do *deck*, ou seja, todas as usinas passaram a operar sem usinas de jusante;
- Como as vazões de uso consuntivo e evaporações atuam diretamente nas vazões afluentes, estas variáveis foram eliminadas do *deck*, de modo a concentrar os efeitos energéticos apenas nas vazões afluentes;
- No *deck* do MSUI utilizado, algumas usinas, como Belo Monte, apresentam indisponibilidades diferentes das de Bracier. Para as simulações deste estudo, já que o objetivo é estudar a sensibilidade para perda energética efetiva em relação aos valores de Bracier, utilizaram-se as indisponibilidades de Bracier para todas as usinas.
- Foram eliminadas do *deck* algumas poucas usinas que apresentaram resultados inesperados (como energia firme maior com indisponibilidade do que sem).

A partir das simulações efetuadas (uma com indisponibilidade Bracier e outra com indisponibilidade igual a zero), a Figura 4 apresenta a relação encontrada entre os valores de  $RQ_{média}$  e  $RI_{média}$ , e a Figura 5 apresenta a relação correspondente entre os valores de  $RQ_{firme}$  e  $RI_{firme}$ .

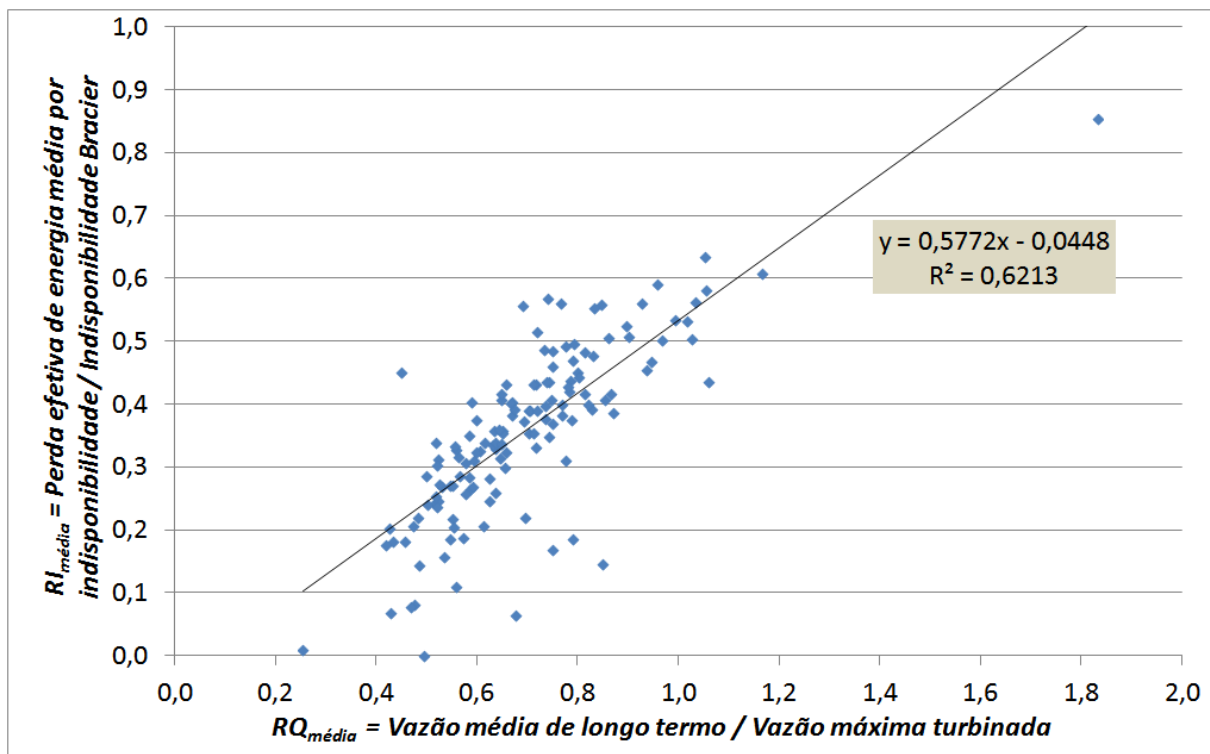


Figura 4 – Relação entre  $RI_{média}$  (Perda efetiva de energia média por indisponibilidade dividida pela indisponibilidade de Bracier) e  $RQ_{média}$  (vazão média afluente no período completo dividida pela vazão máxima turbinada) para as usinas do *deck* do MSUI da EPE para o Leilão A-5 de 2012

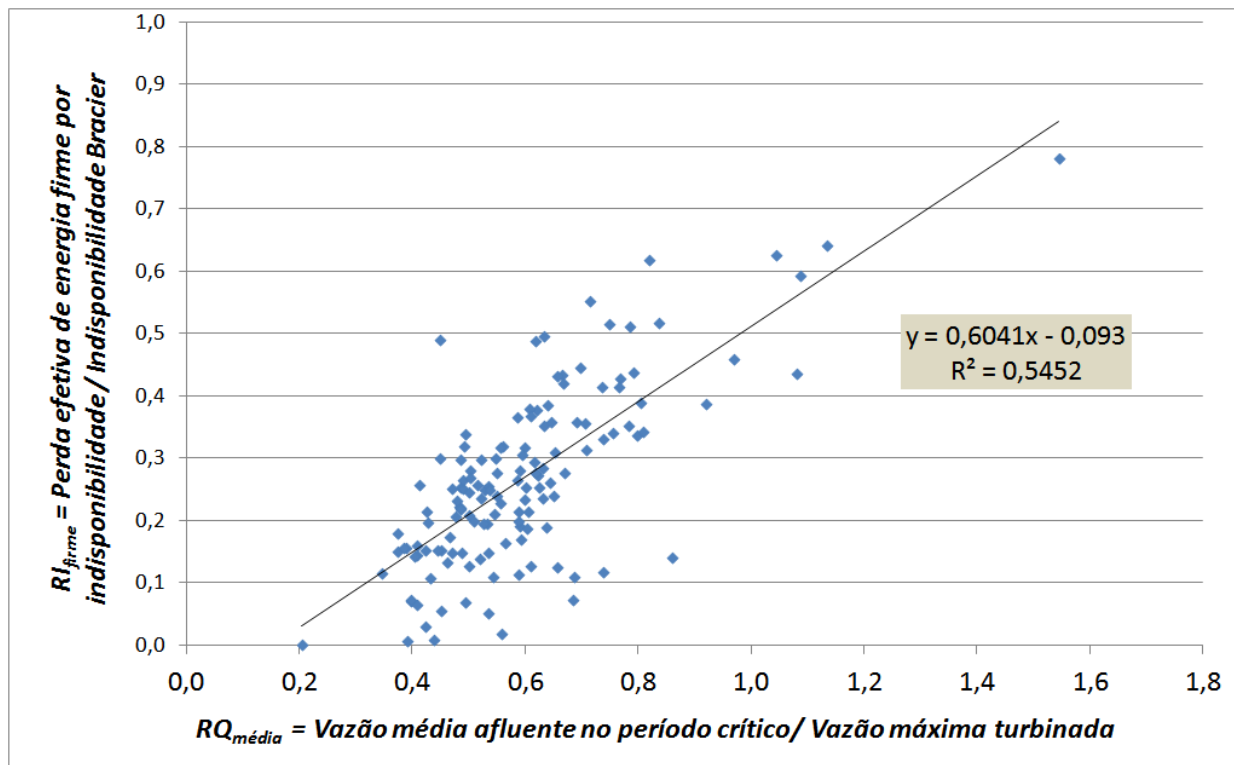


Figura 5 – Relação entre  $RI_{firme}$  (Perda efetiva de energia média por indisponibilidade dividida pela indisponibilidade de Bracier) e  $RQ_{firme}$  (vazão média afluyente no período crítico dividida pela vazão máxima turbinada) para as usinas do deck do MSUI da EPE para o Leilão A-5 de 2012

Das Figuras 4 e 5 são obtidas as seguintes relações:

$$RI_{média} = -0,0448 + 0,5772.RQ_{média} \quad (7)$$

com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,6213, e

$$RI_{firme} = -0,0930 + 0,6041.RQ_{firme} \quad (8)$$

com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) correspondente de 0,5452.

Por mais que não sejam altos os valores de  $r^2$  encontrados, considera-se que eles são bastante satisfatórios para os objetivos deste trabalho, tanto em termos da análise do comportamento da indisponibilidade do MSUI, como na obtenção de uma relação simples que dê um indicativo da perda efetiva energética por indisponibilidades que possa ser utilizada de maneira expedita.

## APLICAÇÃO EM ITIQUIRA I

Considerando o caso já apresentado de Itiquira I, a energia firme resultante da simulação com o deck é igual a 43,15 MW médios, e o interesse estaria em saber simplificada qual a perda efetiva por indisponibilidade, dado que a indisponibilidade Bracier total é igual a 0,06958 para a sua faixa de potência unitária.

Para esta usina, a vazão máxima turbinada é igual a 79,5 m<sup>3</sup>/s, e a vazão média afluyente do período crítico é igual a 63,5 m<sup>3</sup>/s. Na aplicação das fórmulas (5) e (8) chega-se ao seguinte resultado:

$$RI_{\text{firme}} = -0,0930 + 0,6041 \cdot \left( \frac{63,5}{79,5} \right) = 0,3895$$

A partir da fórmula (2), a perda efetiva de energia firme por indisponibilidade ( $PEEI_{\text{firme}}$ ) é igual a

$$PEEI_{\text{firme}} = 0,3895 \times 0,06958 = 0,0271$$

Como a perda de efetiva real de energia firme em Itiquira I é igual a 0,0235 (ver acima), pode-se considerar que o valor obtido com a fórmula (8), igual a 0,0271, é satisfatório, dados os objetivos do presente artigo.

## CONCLUSÃO

O artigo apresentou uma relação entre a perda efetiva de indisponibilidades no MSUI em função de uma variável dada pela divisão entre vazão média afluyente e vazão máxima de turbinamento. O valor de r<sup>2</sup> na relação para energias média e firme, respectivamente iguais a 0,6213 e 0,5452, foram considerados satisfatórios dados os objetivos eminentemente práticos e de análise, levados em conta no presente trabalho.

## 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.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE (2011). Estudos para a Licitação da Expansão da Geração - Garantia Física dos Empreendimentos Hidrelétricos - Leilão de Compra de Energia. Rio de Janeiro – RJ, 39 p.