



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -GPL

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GPL

REGULARIZAÇÃO DO SUPRIMENTO DE ENERGIA – O PAPEL DA COMPLEMENTARIDADE

Thiago C. César *

**Pedro A. M-S.
David ***

Amaro O. Pereira

Ronaldo A. Souza

**Renata N. F.
Carvalho**

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

RESUMO

O aproveitamento do potencial hidrelétrico da bacia amazônica deverá ser feito, em grande parte, por usinas a fio d'água, tanto em decorrência das condições topográficas, ou seja, devido ao relevo pouco acidentado, como também das dificuldades para licenciamento ambiental para alagamento de áreas além da calha natural dos rios.

Quando uma usina hidrelétrica a fio d'água é adicionada no sistema, há um incremento da produtividade da cascata em que ela é inserida. Consequentemente, a distribuição da capacidade de produção hidrelétrica é multiplicada por uma constante que é praticamente igual ao fator de ampliação da potência instalada.

Assim, embora a ampliação da produtividade implique em um aumento da produção média na mesma proporção, há um aumento muito maior da variabilidade (dispersão da distribuição) do suprimento de energia hidrelétrica. Consequentemente, a ampliação da energia assegurada do sistema pode ser significativamente menor do que a da produtividade, refletindo-se numa perda de competitividade da geração hidrelétrica.

A maior variabilidade da produção hidrelétrica implica, portanto, na maior incerteza e variação do custo marginal de operação do sistema e, consequentemente, no aumento do despacho por mérito econômico da geração termelétrica convencional, o que eleva o custo de operação do sistema, o preço da energia elétrica no mercado à vista e o preço dos contratos de curto prazo, os quais são comumente negociados no mercado livre.

Assim, a redução da capacidade de regularização, em consequência da introdução de usinas hidrelétricas a fio d'água no sistema, traz consequências negativas para todos os agentes:

- 1) Perda de competitividade da geração hidrelétrica, devido a uma menor ampliação da energia assegurada em relação à ampliação da produtividade;
- 2) Aumento da produção termelétrica, implicando em aumento do custo de operação e do preço da energia elétrica no mercado à vista;
- 3) Ampliação da variabilidade (incerteza) do preço da energia elétrica no mercado à vista e do preço dos contratos de curto prazo.

Estes efeitos negativos já podem ser observados no mercado brasileiro de energia elétrica.

A complementaridade dos regimes hidrológicos das diversas bacias pode contribuir para melhor a regularização do suprimento de energia hidrelétrica, através do intercâmbio entre subsistemas. No entanto, as grandes distâncias entre os novos aproveitamentos na bacia amazônica aos centros consumidores implicam em investimentos elevados em capacidade de transmissão.

Por outro lado, a sinergia entre a geração hidrelétrica e as fontes renováveis alternativas, em particular a geração termelétrica a biomassa cuja safra na região sudeste ocorre no período seco daquele subsistema e a geração eólica, cuja disponibilidade energética é naturalmente complementar ao regime pluvial, melhoram a regularização do

(*) Av. Rio Branco, 1 / 11º – CEP 22.290-003 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 3512-3364 – thiago.cesar@epe.gov.br
Tel: (+55 21) 3512-3260 – pedro.david@epe.gov.br

suprimento de energia elétrica, sem o ônus do aumento da capacidade de transmissão, uma vez que se localizam próximos aos centros de carga.

Este trabalho apresenta um estudo energético sobre o efeito sobre a distribuição da capacidade de suprimento e sobre a energia assegurada do sistema da adição de geração termelétrica a biomassa e da adição de geração eólica.

Vale destacar que o efeito da adição de geração eólica será estudado através de simulação dinâmica da operação do sistema, utilizando o processo estocástico da produção eólica e não apenas adicionado o valor esperado médio mensal, que não captura a correlação da disponibilidade energéticas das fontes hidrelétrica e eólica.

PALAVRAS-CHAVE

Regularização, Complementaridade, Geração a Biomassa, Geração Eólica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Distribuição da Capacidade de Produção de um Sistema Hidrotérmico

A produção hidroelétrica depende da afluência hídrica que é incerta, mesmo quando existem reservatórios regularizadores, cuja capacidade é sempre finita.

A figura 1 abaixo mostra a distribuição típica da capacidade de produção hidroelétrica anual, na qual se pode observar que capacidade “firme”, disponível em todos (100%) os cenários hidrológicos, é relativamente pequena em relação à capacidade máxima, disponível em um percentual pequeno de cenários, ou mesmo em relação à produção média.

A figura 1 também mostra que a capacidade “assegurada”, disponível em 95% dos cenários, embora maior do que a firme, também é relativamente reduzida, se comparada à capacidade máxima ou à média. De acordo com a regulamentação vigente da comercialização de energia, esta é a capacidade que pode ser comprometida em contratos de suprimento de energia.

Por fim, a figura 1 também mostra a capacidade de produção disponível em menos de 95% dos cenários (capacidade “secundária”).

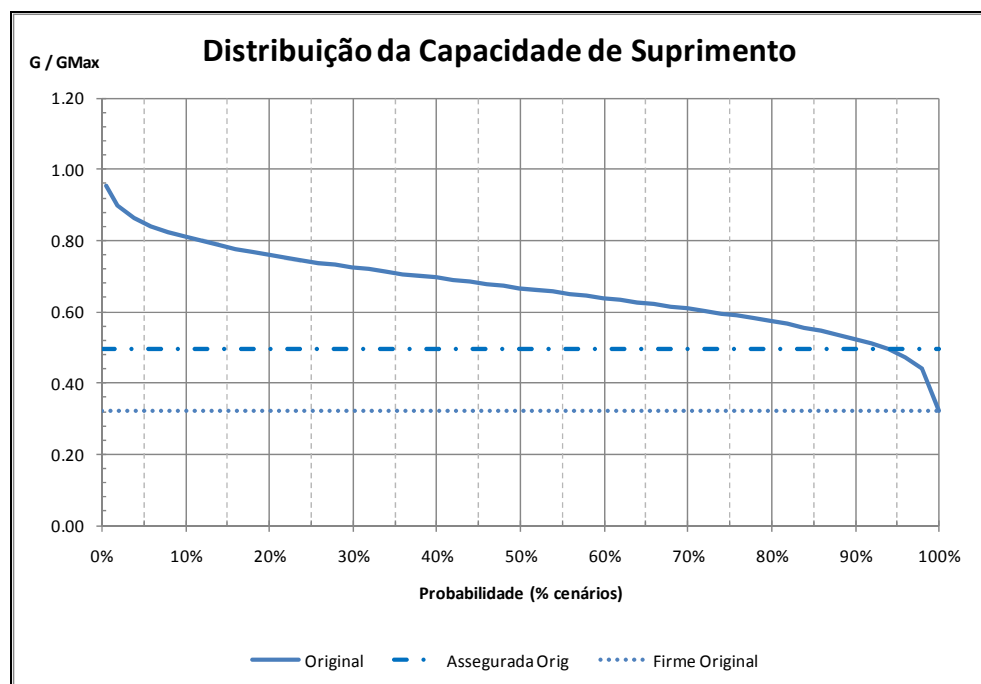


FIGURA 1 – Distribuição da Capacidade de Produção Hidroelétrica

1.2 – Expansão da Capacidade de Produção sem Complementaridade

Quando uma usina hidroelétrica a fio d'água (capacidade de regularização mensal desprezível) é adicionada numa bacia hidrológica¹, a produtibilidade hidrelétrica da bacia (p) é incrementada e a capacidade de produção (G) é multiplicada por uma constante igual à razão entre a nova e a antiga produtibilidade total:

¹ Estamos supondo que as vazões incrementais da bacia são perfeitamente correlacionadas (fator de correlação =

$$G_0 = p_0 Q_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$G = (G_0 + \Delta G) = (p_0 + \Delta p) Q_0 \dots\dots\dots (2)$$

$$k \equiv (p_0 + \Delta p) / p_0 = G / G_0 \rightarrow G = k G_0 \dots\dots\dots (3)$$

Assim, o aumento da capacidade de geração provoca uma expansão da distribuição da capacidade de produção, isto é, a capacidade de produção associada a cada percentil é multiplicada pelo fator (k) de expansão da produtividade, como mostrado na figura 2 abaixo.

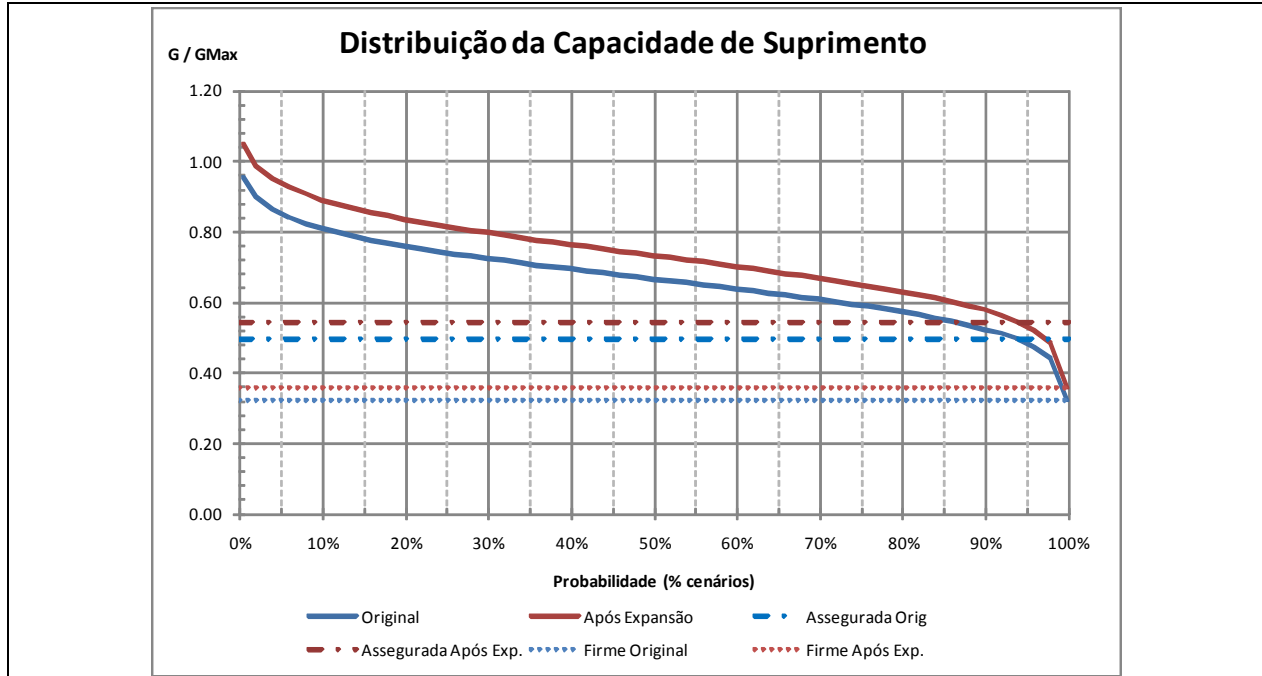


FIGURA 2 – Distribuição da Capacidade de Produção - Expansão sem Complementaridade Hidrológica

Como neste caso, a produção adicionada é perfeitamente correlacionada com a original, a variância da distribuição da capacidade de produção aumenta na proporção do quadrado do ganho de produtividade:

$$\sigma^2 = E\{(G - \mu)^2\} = E\{[k(G_0 - \mu_0)]^2\} = k^2 E\{(G_0 - \mu_0)^2\} = k^2 \sigma_0^2 \rightarrow \sigma^2 = k^2 \sigma_0^2 \dots\dots\dots (4)$$

Se a distribuição da “capacidade de produção” for “normal” (gaussiana), a aumento da capacidade de produção perfeitamente correlacionada com a original provoca uma expansão, na mesma proporção (k), na “capacidade assegurada”. Se a distribuição tiver assimetria positiva (cauda longa à direita), a “capacidade assegurada” cresce em proporção inferior à da média. Portanto,

$$P_{95\%}(G) \leq k P_{95\%}(G_0) \dots\dots\dots (5)$$

1.3 – Expansão da Capacidade de Produção com Complementaridade

Quando uma usina hidroelétrica a fio d’água é adicionada em uma bacia cujo regime hidrológico seja complementar (fator de correlação < 1) ao da existente, a distribuição capacidade de produção total também é expandida, mas neste caso, o ganho de “capacidade assegurada” é maior do que o ganho da capacidade média, pois há uma redução da incerteza sobre a capacidade de produção, como mostrado na figura 3 abaixo:

$$G = G_a + G_b \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma^2 = E\{(G - \mu)^2\} = E\{[(G_a + G_b) - (\mu_a + \mu_b)]^2\} \rightarrow \sigma^2 = \sigma_a^2 + \sigma_b^2 + 2 \sigma_{ab} = \sigma_a^2 + \sigma_b^2 + 2 \rho_{ab} \sigma_a \sigma_b \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_{ab} < 1 \rightarrow \sigma^2 < k^2 \sigma_a^2 \quad k = (G_a + G_b) / G_a \dots\dots\dots (8)$$

$$\rightarrow P_{95\%}(G) > k P_{95\%}(G_a) \dots\dots\dots (9)$$

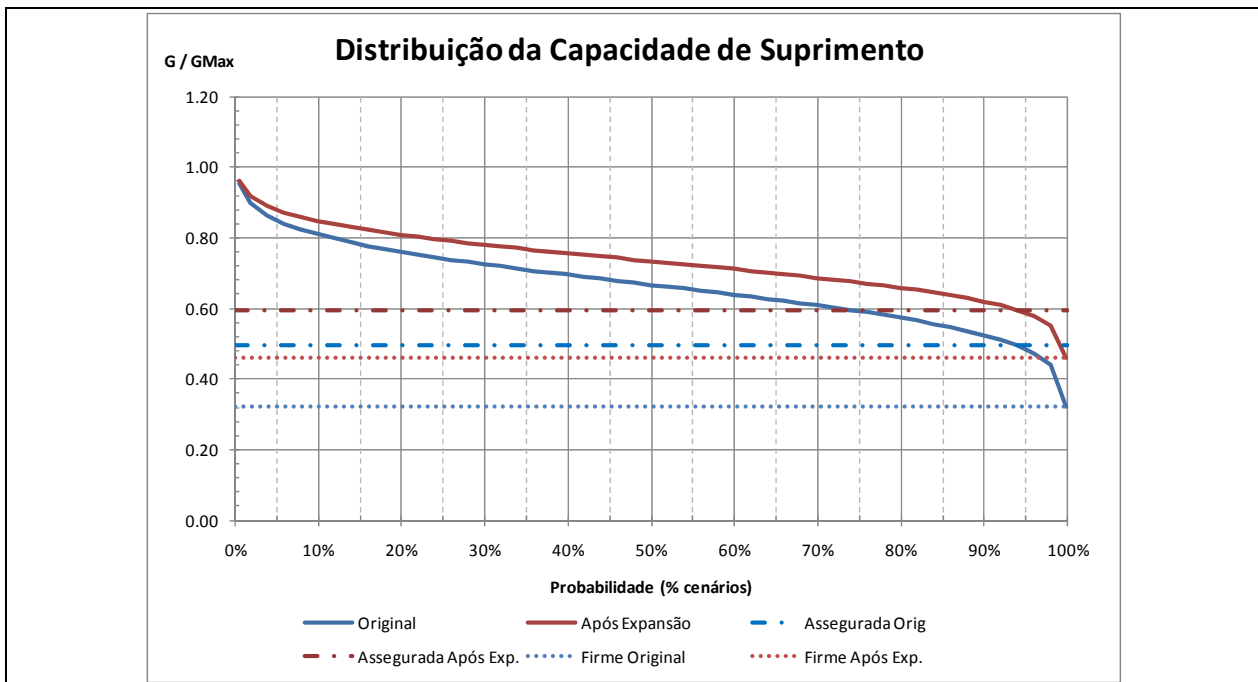


FIGURA 3 – Distribuição da Capacidade de Produção - Expansão com Complementaridade Hidrológica

O efeito da complementaridade hidrológica na redução da incerteza é conhecido na economia como “efeito portfólio”, pois a incerteza sobre a renda proporcionada por um conjunto de ativos diversificados é menor do que se o mesmo capital fosse investido em um único destes ativos.

A figura 4, abaixo, mostra a complementaridade da oferta de energia eólica (Nordeste) e biomassa (Sudeste), em relação à hidroelétrica (Sudeste).

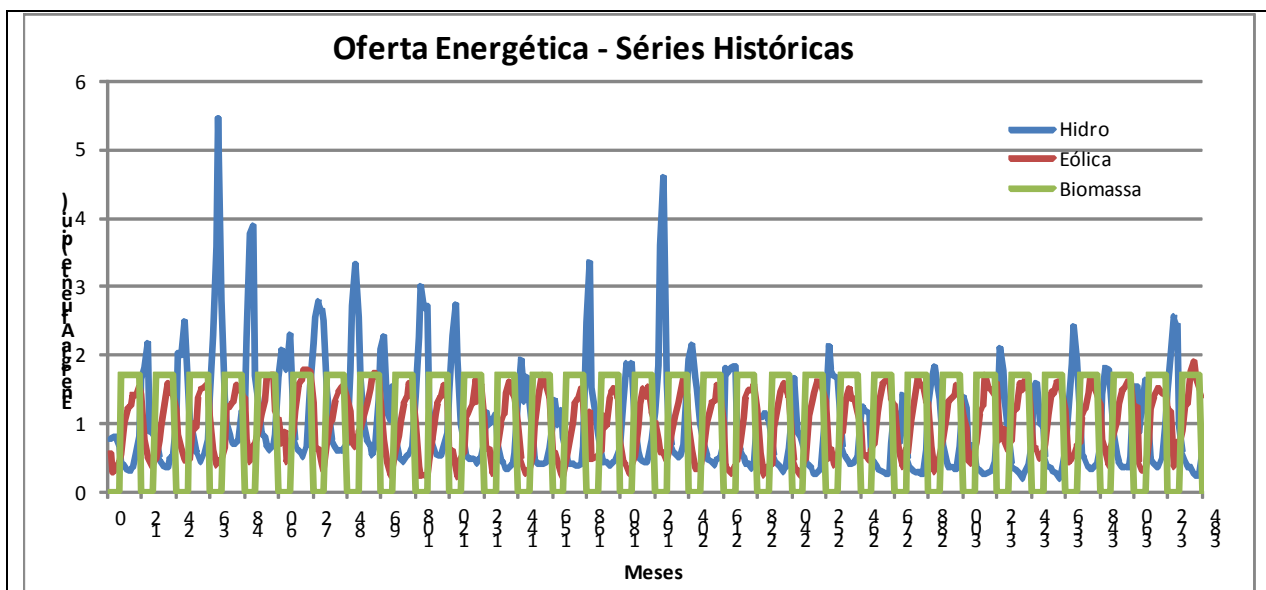


FIGURA 4 – Histórico da Oferta Energética Hidro x Eólica x Biomassa

A figura 5, abaixo, mostra que a dispersão (incerteza) da combinação das ofertas energéticas hidro, eólica e biomassa é menor do que cada uma delas individualmente.

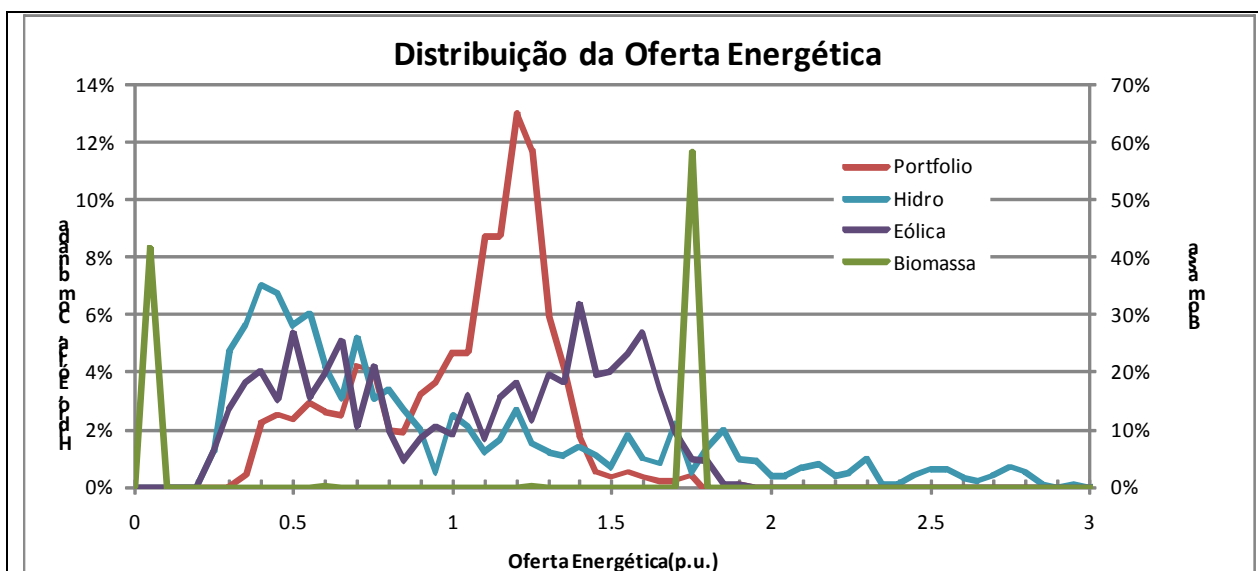


FIGURA 5 – Distribuição da Oferta Energética Hidro x Eólica x Biomassa x Combinada

2 ESTUDO

2.1 METODOLOGIA

O estudo compara a operação do sistema em regime (configuração estática) em três alternativas de configuração de geração complementar, com a mesma produção média:

- (i) incremento da capacidade de geração hidroelétrica (geração a fio d'água não complementar);
- (ii) adição de geração a biomassa;
- (iii) adição de geração eólica, cada alternativa em três níveis de potência (1000, 3000 e 5000 MW).

Vale observar que a geração eólica foi representada estocasticamente como se fosse uma geração hidroelétrica a fio d'água que recebe como energia afluente um histórico de energia eólica da região Nordeste.

A configuração do caso base foi a do final do PDE 2019 sem as usinas termelétricas², completando a motorização das usinas incompletas e então mantendo esta configuração estática por 10 anos. Os casos foram convergidos (determinação da carga crítica) considerando somente o critério de risco de déficit $\approx 5\%$ ³, mantendo constante a proporção de carga nos quatro subsistemas (Sudeste, Sul, Nordeste e Norte).

2.2 RESULTADOS

A figura abaixo mostra a carga crítica do sistema após a adição de cada alternativa, demonstrando que, para a mesma potência e capacidade média adicionada, a geração eólica e a geração a biomassa agregam mais energia assegurada ao sistema do que a geração hidroelétrica a fio d'água.

² O estudo foi feito sem a geração termelétrica para analisar somente o efeito da complementaridade entre as fontes renováveis.

³ A convergência para determinação da carga crítica foi feita considerando somente o critério de risco de déficit, pois o sistema utilizado só continha geração renovável.

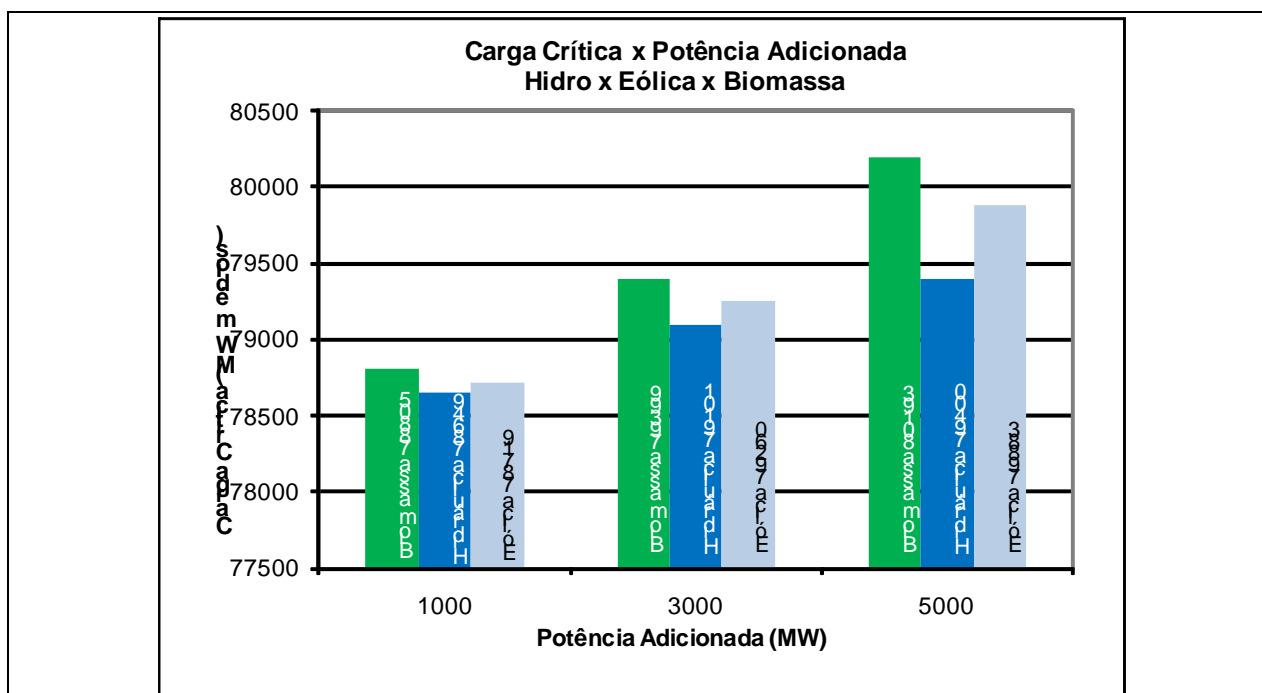


FIGURA 6 – Carga Crítica do Sistema – Alternativas de Adição de Energia Renovável

O maior incremento de carga crítica proporcionado pela geração eólica e ainda mais pela geração a biomassa deve-se à redução da incerteza sobre a capacidade de produção, devido à complementaridade destas fontes com a geração hidroelétrica.

3 CONCLUSÃO

Este breve estudo demonstrou que a complementaridade entre a geração eólica e/ou a biomassa e a geração hidroelétrica proporciona um ganho de capacidade de suprimento, que a geração hidroelétrica só pode proporcionar pela complementaridade entre os regimes hidrológicos e/ou pela construção de reservatórios, que cada vez menos podem ser viabilizados em função das restrições sócio ambientais, que são muito menos condicionantes para a geração eólica e a biomassa.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- David, P.; Cesar, T.; Olímpio, A.; Brandão, S. - The Contribution of Wind Power to the Brazilian Power Supply Regularity; Brazil Wind Power Seminar. Rio de Janeiro. 2010
- Carvalho, R. - Contribuições para a Determinação de uma Estratégia de Expansão da Geração de um Sistema Hidrotérmico. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010
- Oliveira, F.; Rigamonti, R.; Sampaio, L.; Lima, J. H.; Silva, S; Marzano, L. G. - Estudo Energético da Implantação de Usinas Eólicas na Oferta de Energia do Sistema Interligado Nacional – Complementaridade dos Regimes Hidrológico e Eólico. XX SNPTEE – GPL VII, Recife, 2009.
- Castro, N.; Brandão, R.; Dantas, G. – Considerações sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hídrico Brasileiro. Textos de Discussão do Setor Elétrico. nº 15. GESEL, IE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.

5 DADOS BIOGRÁFICOS

- Thiago C. César: graduado em Engenharia Elétrica (EE) pela UFJF em 2007. Trabalha na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2008, na área de Planejamento da Geração onde tem desenvolvido diversos estudos, dentre os quais destacam-se os estudos de viabilidade técnica e econômica de usinas hidrelétricas e modelagem energética de usinas hidrelétricas.
- Pedro A. M-S. David: graduado em EE pela UFRJ em 1974, mestre em ciência em EE com ênfase em Controle Digital e Processamento de Sinais, pela PUC-RIO em 1995, doutor em EE com ênfase em mercados de energia, pela PUC-Rio em 2006. Trabalha na EPE desde 2006, na área de Planejamento da Geração onde tem desenvolvido diversos estudos, dentre os quais destacam-se os estudos metodológicos.

- Amaro O. Pereira: graduado em Economia pela UFF em 1974, mestre em ciência em Planejamento Energético, pela COPPE/UFRJ em 2000, doutor em Planejamento Energética, pela COPPE/UFRJ em 2005. Trabalha na EPE desde 2005, na área de Planejamento da Geração onde tem desenvolvido diversos estudos, dentre os quais destacam-se os estudos metodológicos e de planejamento de longo prazo.
- Ronaldo A. Souza: graduado em EE pela UFRJ em 2001. Trabalha na EPE desde 2007, na área de Planejamento da Geração onde tem desenvolvido diversos estudos, dentre os quais destacam-se os estudos energéticos para inventários hidrelétricos de bacias hidrográficas.
- Renata N. F. Carvalho: graduada em EE pela UFRJ em 2006, mestre em ciência em EE com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, pela COPPE/UFRJ em 2010. Trabalha na EPE desde 2007, na área de Planejamento da Geração onde tem desenvolvido diversos estudos, dentre os quais destacam-se os estudos metodológicos e de planejamento de médio prazo.