



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

BR/GPL/17
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

**AValiação da Confiabilidade do Sistema Elétrico do Rio Grande do Sul
Considerando as Séries Temporais de Geração Hidrelétrica e Eólica**

Vanessa S. Lopes, (*)
EPE

Carmem L. T. Borges
COPPE-UFRJ

Marcos Vinicius G. D. S. Farinha
EPE

Jurema Ludwig
EPE

RESUMO

A avaliação cronológica da confiabilidade requer que as séries temporais da geração eólica e hidráulica, assim como as curvas de demanda do sistema, sejam avaliadas ao longo do tempo de forma a detectar as possíveis correlações entre os dois tipos de geração e a carga. Ao se avaliar a correlação temporal entre essas séries é possível captar o efeito conjunto de fenômenos naturais como os regimes de chuvas e ventos da região em análise.

O impacto da complementaridade entre a geração eólica e a geração hidráulica, bem como da correlação entre a carga e a geração na confiabilidade composta foi objeto do trabalho "Avaliação da Influência da Representação das Séries Temporais de Geração Hidrelétrica e Eólica na Confiabilidade Composta do Sistema Elétrico".

O RS apresenta um parque gerador composto basicamente por usinas hidráulicas, usinas térmicas e um potencial de energia eólica em franca expansão. Atualmente, os parques eólicos instalados no estado totalizam 230MW, porém, com as contratações realizadas nos últimos leilões de energia, essa potência instalada aumentará para 1116MW no ano de 2014. Outro aspecto interessante é que o potencial eólico está localizado tanto na região litorânea quanto no interior do estado, o que pode vir a destacar a complementaridade entre os parques eólicos dessas regiões.

O presente artigo mostra os resultados da avaliação, do ponto de vista da confiabilidade composta, do desempenho do sistema de transmissão e geração do estado do Rio Grande do Sul, incorporando as séries temporais das fontes primárias de energia e da carga.

PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade, Simulação Monte Carlo Sequencial, Usinas Eólicas e Usinas Hidrelétricas

1.0 - INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul é suprido através de um sistema de transmissão em 525kV e 230kV sendo complementado com geração interna do estado com as usinas da Bacia do Rio Jacuí, com as usinas térmicas a carvão em Presidente Médici e Charqueadas, as usinas térmicas a gás em Uruguaiana e Canoas, as centrais eólicas em Osório além das interligações internacionais em Livramento, Garabi e Uruguaiana.

Os principais pontos de suprimento em 525kV do estado do Rio Grande do Sul são: a SE 525/230kV Gravataí, onde chegam linhas provenientes de Nova Santa Rita e Caxias; a SE 525/230kV Caxias, atendida por uma linha

(*) Avenida Rio Branco, n° 001 – sala 1101 – CEP 20090-003 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 3512-3415 – Email: Vanessa.stephan@epe.gov.br

proveniente de Campos Novos e Itá; a SE 525/230kV Nova Santa Rita, atendida por linhas de Itá, Gravataí e Campos Novos; e a SE 525/230kV Santo Ângelo, atendida pelo seccionamento das linhas de 525kV Garabi - Itá.

O sistema de 230kV do Rio Grande do Sul interliga-se com o estado de Santa Catarina através das seguintes linhas de transmissão em 230kV: LT Xanxerê - Passo Fundo; LT Siderópolis - Farroupilha, passando pelas SEs Lajeado Grande e Caxias 5; e também a LT Barra Grande – Lagoa Vermelha 2.

Observa-se que o atendimento ao estado do Rio Grande do Sul continuará fortemente dependente da integridade e robustez do sistema de 525kV, bem como dos níveis de intercâmbios que venham a ser praticados.

Dentre as contingências simples no sistema de 525 kV que atende ao Rio Grande do Sul, a mais severa é a perda da LT 525 kV Campos Novos – Nova Santa Rita e o pior cenário para esta contingência é o Norte Exportador, que tem as seguintes características:

- Hidrelétricas em 45% da capacidade instalada;
- Conversora de Garabí com despacho nulo;
- Termelétricas a carvão despachadas de acordo com a inflexibilidade;
- Termelétricas a gás com despacho nulo;
- Carga do Rio Grande do Sul maximizada no verão;
- Eólicas zeradas.

Os estudos desenvolvidos pelo ONS no ciclo 2013/2015 apontam a necessidade de despacho das térmicas de Presidente Médici e Candiota para suportar a contingência LT 525 kV Campos Novos – Nova Santa Rita, evitando o corte de carga no verão de 2013/2014.

Cabe ressaltar que a necessidade de geração térmica preventiva, para evitar o corte de carga, deverá ser mitigada com a implantação da LT 525 kV Itá - Nova Santa Rita C2, com extensão de 314 km, a ser implantada no início do ano de 2014 e portanto não disponível para operação no verão de 2013/2014.

Analisando este cenário, sem os reforços previsto para a região, o sistema de transmissão de 230 kV e de 525 kV apresenta violações severas na contingência da LT 525 kV Campos Novos – Nova Santa Rita.

A simulação de fluxo de potência não permite calcular o corte de carga de forma otimizada, já que seria necessário o corte carga manual nas subestações no entorno da região afetada até que o sistema atingia um ponto de operação sem violação. Os resultados apresentados nas simulações a seguir pretendem avaliar o corte de carga, através da análise de confiabilidade, com o despacho considerado nas análises determinísticas bem como com as séries temporais de geração eólica e hidráulica.

2.0 - METODOLOGIA ADOTADA

2.1 Simulação Monte Carlo Sequencial

O cálculo dos índices de confiabilidade por simulação Monte Carlo sequencial pode ser expresso pela avaliação de (1):

$$\bar{E}(G) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G(y_k) \quad (1)$$

onde N é o número de séries sintéticas anuais simuladas, y_k é a série sintética anual composta pelos estados amostrados sequencialmente dentro do ano k , G é uma função teste para o cálculo dos índices de confiabilidade anuais e $\bar{E}(G)$ fornece uma estimativa dos índices de confiabilidade calculados sobre todas as séries sintéticas simuladas. A incerteza em torno das estimativas dos índices é calculada pelo coeficiente de variação α definido por (2):

$$\alpha = \frac{\sqrt{V(\bar{E}(G))}}{\bar{E}(G)} \quad (2)$$

O programa para avaliação da confiabilidade composta foi desenvolvido em C++ e utiliza o modelo orientado a objetos que é constituído por um conjunto de classes que descrevem toda a estrutura do sistema como apresentado abaixo:

- *Classe base chamada classe Simulador Base:* Esta classe implementa as características bases independente do método de simulação.

- **Classes filhas:** São programadas de acordo com o método de simulação Monte Carlo utilizado, o sequencial ou o não sequencial.

A classe base é utilizada independente do método de simulação adotado e as classes filhas são utilizadas de acordo com o método de simulação Monte Carlo adotado. A **Figura 1** mostra as etapas bases da simulação Monte Carlo genérica e aponta quais delas estão implementadas na classe base e quais estão nas classes filhas.

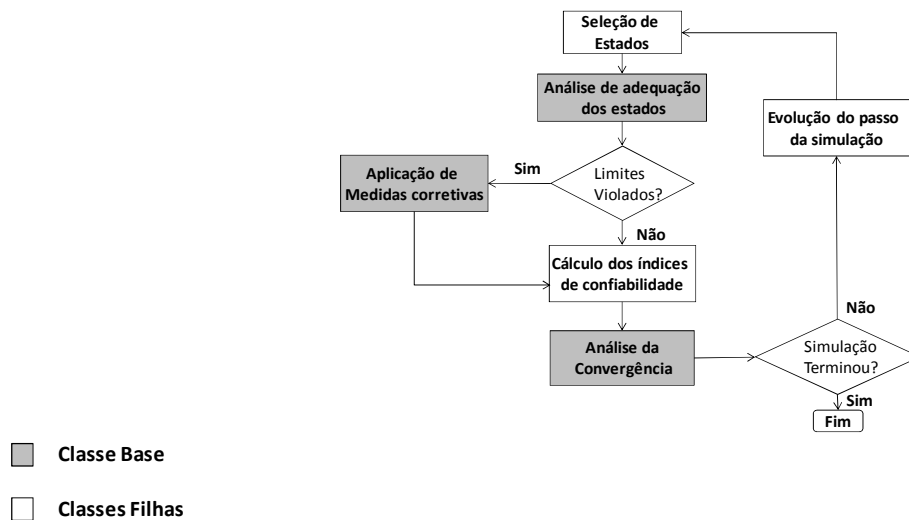


Figura 1 – Modelo de simulação Monte Carlo genérico

No presente trabalho foi utilizada a classe filha referente à simulação Monte Carlo Sequencial e as etapas do processo são descritas abaixo, considerando a simulação sequencial:

- **Seleção de Estados:** sorteio, nos modelos de componentes, dos estados dependentes das horas no decorrer do ano.
- **Análise de Adequação do Estado:** avaliação da existência de violação nos limites operativos da rede através de um fluxo de potência não linear.
- **Análise de Medidas Corretivas:** aplicação de medidas corretivas para retornar o sistema para um estado sem violação de limites, com a utilização do fluxo de potência ótimo.
- **Cálculo dos Índices de Confiabilidade:** cálculo dos índices de confiabilidade computados nas suas respectivas séries anuais.
- **Análise de Convergência:** cálculo das incertezas das estimativas dos índices para utilização como critério de decisão para término da simulação.
- **Evolução do Passo de Simulação:** incremento das horas do ano, sendo que na última hora os índices de confiabilidade são computados nas suas respectivas séries anuais.

Vale ressaltar que a simulação Monte Carlo sequencial demanda um esforço computacional alto devido ao grande número de estados a serem analisados. O trabalho inicial não se preocupou com a redução do tempo de simulação e sim em capturar os resultados da forma mais real possível. Entretanto, existem algumas técnicas que podem ser utilizadas para contornar o problema do esforço computacional excessivo, como por exemplo, a simulação Pseudo-Sequencial e a simulação Pseudo-Cronológica.

2.2 Premissas adotadas para o despacho de geração

O despacho de geração considerado para as usinas existentes no RS foi:

- usinas eólicas geram em função da disponibilidade do vento.
- usinas hidráulicas a fio d'água geram em função da vazão disponível, verificada através das séries temporais de potência inseridas como um dos dados de entrada.
- usinas térmicas e as hidráulicas com reservatório são despachadas de forma que o sistema seja capaz de suprir o restante da carga.

3.0 - CARACTERÍSTICA DO SISTEMA UTILIZADO

Para análise do caso do Rio Grande do Sul foi utilizado um sistema equivalente de forma a representar as usinas hidrelétricas e as usinas eólicas de Osório e de Livramento.

Este sistema é composto por 9 barras de 525 kV, 31 barras de 230 kV e mais 21 barras representando geração e carga. Além disso, 49 linhas de 230 kV, 14 linhas de 525 kV, 10 transformadores de 525/230 kV e mais 27 transformadores de fronteira compõem o sistema que atende a uma carga de 6000 MW com geração total disponível de 6690 MW (400 MW de geração térmica, 240 MW de geração eólica, 2394 MW geração hidráulica a fio d'água, 1398 MW hidrelétricas com reservatório e 2240 MW de injeção equivalente).

Esse sistema foi obtido através da injeção de potência equivalente nas barras de fronteira da região e validado através de simulações no programa ANAREDE e no NH2, sempre comparando os resultados obtidos no sistema equivalente com os do caso brasileiro completo. A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar do sistema equivalente utilizado, sem considerar os reforços previstos.

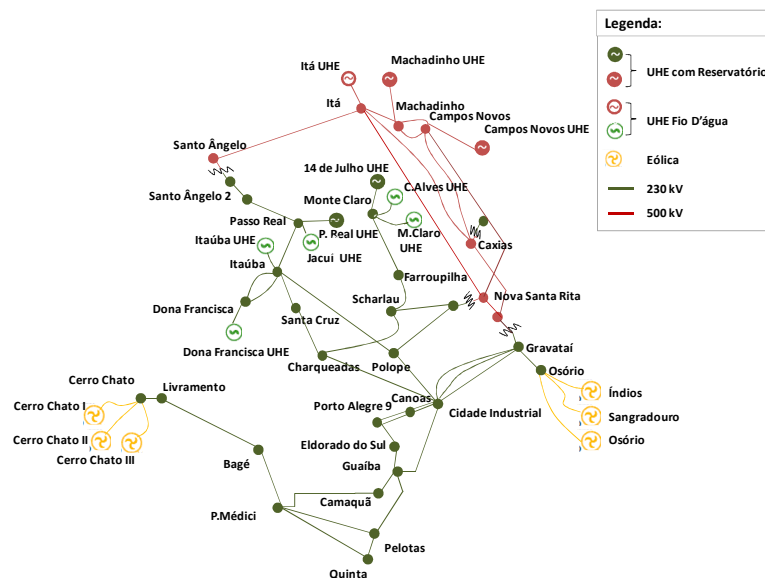


Figura 2 – Sistema equivalente Rio Grande do Sul sem reforços

Os reforços considerados nas avaliações do sistema equivalente foram:

- Subestação de 525/230 kV Povo Novo
- Seccionamento da LT 230 kV Camaquã 3 - Quinta na SE Povo Novo,
- LT 525 kV Povo Novo – Nova Santa Rita,
- 2ª LT 525 kV Nova Santa Rita – Itá

Os dados de confiabilidade considerados para as linhas de transmissão e geração hidráulica tiveram como referência a base BDconf do ONS e os dados para geração eólica foram retirado do trabalho “Modelagem de Fazendas Eólicas para Estudos de Confiabilidade”(10).

4.0 - RESULTADOS

Metodologia:

- Na 1ª etapa foram obtidos os resultados de corte de carga, para as mesmas condições da análise determinística, com a utilização do FPO (fluxo de potência ótimo).
- Na 2ª etapa foi realizada uma análise de confiabilidade considerando possíveis falhas em todo sistema com suas respectivas taxas de falha e reparo considerando as curvas no tempo de carga e geração.

Foi avaliado no cenário Norte Exportador - Carga Média na contingência da LT 525 kV Campos Novos - Nova Santa Rita ao longo do verão 2013/2014.

A simulação de fluxo de potência não permite calcular o corte de carga de forma otimizada, já que seria necessária a redução de carga manual nas subestações em análise para que o sistema atingisse um ponto de operação sem violação dos critérios.

O resultado desse processamento leva ao corte de carga de cerca de **115 MW**, retirando-se carga na região de Caxias, quando se considera o despacho de geração eólica. Quando o despacho eólico é nulo, o corte de carga encontrado é de aproximadamente **270MW**, considerando cortes de carga na periferia de Porto Alegre e na região de Caxias.

Na 1ª etapa, o corte de carga obtido com a utilização do FPO - fluxo de potência ótimo e taxa de falha apenas para a LT 525 kV Nova Santa Rita - Itá foi de **116 MW**.

Já na 2ª etapa, foram considerados dois despachos para as usinas eólicas, a saber:

- geração eólica nula, como é feito nos estudos de planejamento desenvolvidos na EPE.
- geração eólica considerando as séries temporais em Livramento e Osório.

Tabela 1 - Corte de Carga Verão 2013/2014 - RS - 2ª etapa

Mês	Corte de carga (com eólica) MW	Corte de carga (sem eólica) MW	Diferença (%)	Diferença (MW)
12/2013	43,8	57,0	23,28%	13,3
01/2014	105,9	127,8	17,15%	21,9
02/2014	125,3	126,3	0,89%	1,13
03/2014	56,4	81,6	30,86%	25,18

Como se pode observar pela **Tabela 1** os cortes de carga, quando da contingência da LT 525 kV Campos Novos - Nova Santa Rita, são maiores nos meses de Janeiro e Fevereiro, o que corrobora as previsões realizadas nos estudos de planejamento.

Pode-se observar, ainda, que o impacto da utilização da geração eólica para a minimização do corte de carga do sistema é relativamente pequeno. Este fato se deve não somente às variações bruscas na geração eólica, mas também ao fato dessa geração representar apenas 3% da potência instalada no estado.

4.1.1 - Cálculo da Geração Térmica Adicional

Ainda considerando os casos de falha da LT 525 kV Campos Novos – Nova Santa Rita ao longo de todo ciclo tarifário, foi calculado o montante adicional de despacho térmico que seria necessário para evitar corte de carga no sistema.

O incremento de geração térmica foi feito em degraus de 50 MW na barra que representa a subestação 230 kV Nova Santa Rita. A **Figura 3** mostra a quantidade de energia térmica adicional necessária para que o corte de carga seja nulo.

Através da avaliação desse gráfico pode-se perceber que a partir de 300 MW adicionais de geração térmica não há mais corte de carga para a contingência da LT 525 kV Campos Novos – Nova Santa Rita ao longo de todo ciclo tarifário 2013/2014.

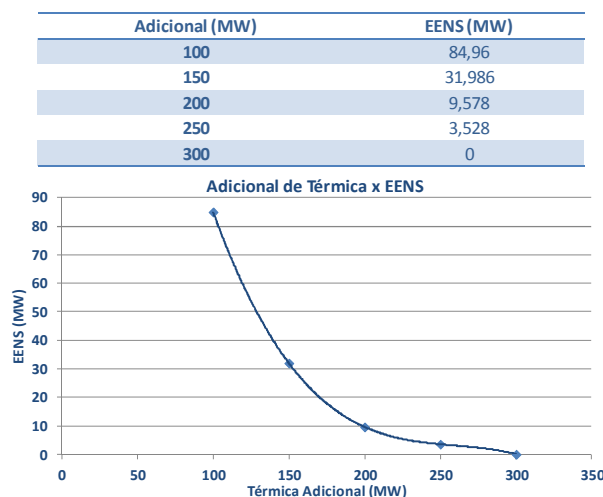


Figura 3 - EENS considerando térmica adicional na subestação Nova Santa Rita

4.1.2 – Consideração da Geração Eólica

As séries temporais apresentam apenas o comportamento do vento para as regiões de Osório e Livramento, dado que estas regiões possuem usinas instaladas há algum tempo e com medições já cadastradas no Sistema AMA da EPE.

Os gráficos refletem as medições informadas pelos parques instaladas nas regiões de Santana do Livramento e Osório, localizadas respectivamente no interior e no litoral do estado. Esses gráficos mostram, ainda, que existe uma complementariedade entre a geração das usinas dessas regiões e que, na média, essas usinas fornecem 60% das suas potências instaladas.

Essa diversidade implica que um aumento da energia eólica nestas regiões pode contribuir para a redução do corte de carga.

Cabe lembrar que o potencial eólico considerado nessas análises foi de apenas 240MW, porém o montante já licitado é de 1116 MW e que um potencial cadastrado nos leilões realizados pela EPE é de cerca de 8900MW.

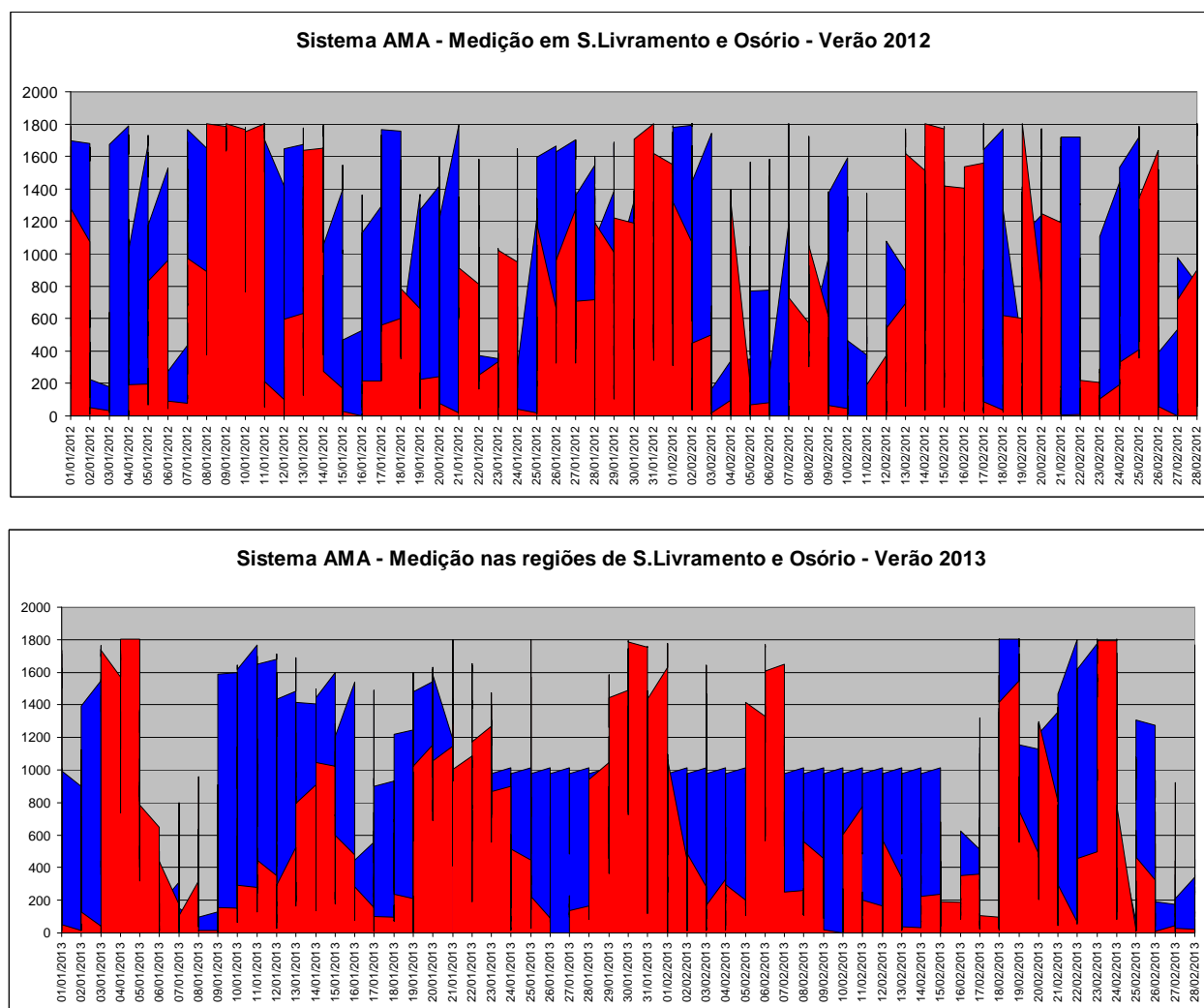


Figura 4 – Medições em S.Livramento e Osório – Sistema AMA - EPE

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado o sistema equivalente do Rio Grande do Sul, retratando o atual problema do estado e assim podendo-se aplicar o trabalho realizado para uma situação real. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos pelo planejamento determinístico da operação deste sistema, que aponta corte de carga para o verão de 2013/2014.

Os resultados mostraram que o corte de carga previsto no planejamento determinístico só ocorre, segundo as avaliações e as premissas adotadas neste trabalho nos meses de verão (dezembro, janeiro, fevereiro e março).

As análises mostraram que 300 MW de geração térmica adicional seriam suficientes para evitar corte de carga no verão 2013/2014 diante da contingência da LT 525 kV Nova Santa Rita – Campos Novos, sem os reforços de transmissão planejados.

A diversidade de ventos entre as regiões do interior e litoral do estado mostram que com o aumento da geração eólica nestas regiões e, possivelmente em outras, contribuem para o alívio do corte de carga.

Além disso, é importante frisar que a inserção da geração eólica sem uma fonte firme para suprir sua indisponibilidade envolve risco de déficit, pois a geração eólica no estado do Rio Grande do Sul atua em conjunto com uma fonte hídrica sem reservatório e, portanto, não é suficiente para eliminar os problemas de corte de carga causados pelas variações intermitentes da geração eólica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOPES, V. S.; BORGES, C. L. T. "Impacto da Complementaridade entre Geração Eólica e Hidráulica na Confiabilidade Composta". *Anais do SBSE 2012 - IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Goiânia, pp. 1-6, 2012.
- [2] DIAS, J. A. S. *Avaliação da Confiabilidade Composta Baseada em Simulação Monte Carlo com Representação da Geração Eólica*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [3] DIAS, J. A.; BORGES, C. L. T. "Modelo Orientado a objetos para avaliação da confiabilidade composta por simulação Monte Carlo com representação da geração eólica". *Revista Controle & Automação/Vol.20*, Julho, Agosto e Setembro 2009.
- [4] DIAS, J. A.; BORGES, C. L. T. "Object Oriented Model for Composite Reliability Evaluation Including Time Varying Load and Wind Generation". *IEEE 11th International conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Julho 2010.
- [5] Mello, J.C.O., Pereira, M. V. F., Silva, A. M. L., "Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems Based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 3, pp. 1318-1326. Agosto 1994.
- [6] Manso, L. A. F., Silva, A. M. L., Mello, J. C. O. "Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Geração e Transmissão Considerando Cargas Variantes no Tempo". *Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Foz do Iguaçu, 17-22 Outubro 1999.
- [7] CEPEL. *Manual do Usuário Anarede*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [8] CEPEL. *Manual do Usuário NH2*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [9] LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA. *Desenvolvimento de uma Base de Dados Aplicada a Estudos de Confiabilidade para Sistemas de Geração e Transmissão*. UFSC, Santa Catarina, RS, Brasil, 2006.composta do sistema Elétrico
- [10] LEITE, A. P. *Modelagem de Fazendas Eólicas para Estudos de Confiabilidade*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [11] LOPES, V. S.; BORGES, C. L. T. "Avaliação da Influência da Representação das séries temporais de Geração hidrelétrica e eólica na confiabilidade" Tese de Mestrado - Março de 2013