

UM ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE ESTADOS NA ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS COMPOSTOS DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO

ANSELMO B. RODRIGUES*, RICARDO B. PRADA§

Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-Rio
Rua Marquês de São Vicente, 225, CEP 22453-900, Rio de Janeiro, RJ
*E-mails: *schaum.nyquist@gmail.com, §prada@ele.puc-rio.br*

MARIA DA GUIA DA SILVA

Departamento de Engenharia Elétrica, UFMA
Av. dos Portugueses, S/N, CEP 65080-040, São Luís, MA
E-mail: guia@dee.ufma.br

Abstract— The two state selection techniques more used in the Voltage Stability Probabilistic Assessment (VSPA) are: the Monte Carlo Simulation (MCS) and the State Enumeration (SE) methods. However, no paper previously published carried out a comparative study between these two techniques. The main aim of this paper is to analyse the performance of the MCS and SE methods in the VSPA of composite systems. The results demonstrate that MCS is more efficient method than the SE. Nevertheless, the SE performance can be significantly improved when the state selection is based on sets of identical components.

Keywords— Voltage Stability, Monte Carlo Simulation, State Enumeration, Optimal Power Flow, D' Matrix Method, Probabilistic Methods.

Resumo— As duas técnicas de seleção de estados mais usadas na Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão (APET) são: a Simulação Monte Carlo (SMC) e a Enumeração de Estados (EE). Entretanto, nenhum artigo previamente publicado realizou um estudo comparativo entre estas técnicas. O principal objetivo deste artigo é avaliar o desempenho dos métodos de EE e SMC na APET de sistemas compostos. Os resultados dos testes demonstraram que a SMC é um método mais eficiente do que a EE. Contudo, o desempenho da EE pode ser significativamente melhorado quando a seleção de estados se baseia em conjuntos de componentes idênticos.

Palavras-chave— Estabilidade de Tensão, Simulação Monte Carlo, Enumeração de Estados, Fluxo de Potência Ótimo, Método da Matriz D', Métodos Probabilísticos.

1 Introdução

A estabilidade de tensão é definida como a capacidade de um sistema de energia elétrica para manter as tensões controláveis em todas as barras após a ocorrência de distúrbios tais como: flutuações de carga e contingências nos equipamentos do sistema (Kundur 1994). Os estados de instabilidade de tensão são causados principalmente por dois mecanismos:

i) Ausência de Solubilidade (Overbye 1994; Granville, Mello, Melo 1996): após a ocorrência de um distúrbio as equações de fluxo de potência não têm solução real devido à violação no limite de máxima transferência de potência para as barras de carga.

ii) Perda de Controlabilidade (Kundur 1994; Prada et al. 2002): após a ocorrência de um distúrbio, as ações de controle, usadas para corrigir o perfil de tensão, têm efeito oposto ao esperado. Por exemplo, a redução da tensão em uma barra após o chaveamento de um banco de capacitores.

Os distúrbios causadores dos estados de instabilidade de tensão são de natureza aleatória. Devido a isto, é importante que a análise de estabilidade de tensão também reconheça as incertezas associadas

com o comportamento estocástico dos distúrbios do sistema. Sob este ponto de vista, os métodos mais adequados para modelar incertezas associadas com distúrbios no sistema são os métodos probabilísticos. A principal vantagem dos métodos probabilísticos é a sua capacidade para combinar severidade e probabilidade para expressar de forma realística o risco do sistema (Billinton & Allan 1992; Billinton & Li 1994). Além disso, vários incidentes causados por problemas de instabilidade de tensão têm sido relatados na literatura (Kundur 1994; Prada et al. 2002). Estes eventos motivaram a publicação de diversos artigos sobre a modelagem probabilística dos distúrbios em estudos de estabilidade de tensão (Melo, Mello & Granville 1997; Billinton & Aboreshaid 1998; Aboreshaid & Billinton 1999; Leite da Silva et al. 2000).

A modelagem probabilística dos distúrbios na APET pode ser realizada usando-se duas representações:

i) Espaço de estados: nesta representação os estados do sistema resultantes das incertezas são selecionados sem considerar qualquer conexão cronológica ou memória.

ii) **Cronológica**: esta representação se baseia na simulação do processo estocástico associado com a operação do sistema. Isto é, aspectos dependentes do tempo são modelados na APET. Geralmente, o processo estocástico referente à operação do sistema é replicado usando a SMC Sequencial (Billinton & Allan 1992).

Contudo, a representação cronológica não tem sido utilizada na APET devido ao seu alto custo computacional. Desta forma, a APET é geralmente realizada usando uma representação por espaço de estados. Na representação por espaço de estados existem duas técnicas para seleção de estados:

i) **SMC Não-Sequencial** (Melo, Mello & Granville 1997; Leite da Silva et al. 2000) – os estados são selecionados aleatoriamente de acordo com as probabilidades dos estados dos componentes, por exemplo: operação e falha para um componente representado por um modelo de dois estados.

ii) **EE** (Billinton & Aboreshaid 1998; Aboreshaid & Billinton 1999) – os estados são selecionados de acordo com os seguintes critérios: ordem máxima para as contingências ou valor mínimo para a probabilidade de um estado.

Neste artigo, o termo SMC Não-Sequencial será abreviado para SMC, pois a representação cronológica (que usa a SMC sequencial) não é aplicada na APET.

É importante mencionar que nenhum artigo previamente publicado realizou uma comparação consistente entre a EE e a SMC na APET. Desta forma, o principal objetivo deste artigo é avaliar a precisão e o desempenho computacional dos métodos de EE e SMC na APET. Esta avaliação será baseada no cálculo dos seguintes índices: Risco de Instabilidade de Tensão (RIT) e probabilidades dos estados de robustez (Leite da Silva et al. 2008). Estes índices foram calculados em uma versão modificada do sistema IEEE-RTS (“IEEE-Reliability Test System”) proposta por Bertoldi, Salvaderi & Scalcino (1988). Este sistema será chamado de IEEE-MRTS daqui por diante. Os resultados dos testes com o sistema IEEE-MRTS demonstraram que o desempenho computacional da SMC é superior aquele associado com a EE na APET. Contudo, o desempenho computacional da EE pode ser significativamente melhorado quando a seleção de estados se baseia em grupos de componentes idênticos.

2 Técnicas de seleção de estados usadas na APET

2.1 Simulação Monte Carlo

Na SMC os índices probabilísticos são estimados a partir de uma amostra aleatória de estados do sistema usando-se a definição de média amostral, ou seja:

$$\tilde{E}[F] = \frac{1}{NA} \sum_{j=1}^{NA} F(x^j) \quad (1)$$

onde:

x^j é o j-ésimo vetor de estado do sistema; cada elemento de x^j representa o estado de um componente. Billinton & Li (1994) apresentam uma descrição detalhada do procedimento de sorteio dos estados dos componentes.

NA é o tamanho da amostra de estados do sistema que foram sorteados;

$F(x^j)$ é a função-teste do índice F para o estado x^j . A definição da função-teste é dependente do índice que está sendo calculado. Por exemplo, para o índice LOLP (Loss of Load Probability) tem-se que $F(x^j) = 1$ quando há corte de carga no estado x^j (estado de falha). Caso contrário, $F(x^j) = 0$ (estado de sucesso).

$\tilde{E}[F]$ é a média amostral da função-teste.

A precisão dos índices estimados pela SMC é avaliada usando-se o coeficiente de variação (Billinton & Li 1994). Este coeficiente é dado por:

$$\beta[F] = \frac{\tilde{\sigma}[F]}{\tilde{E}[F]\sqrt{NA}} \quad (2)$$

onde $\tilde{\sigma}[F]$ é o desvio padrão amostral da função-teste.

Analisando-se a equação (2), pode-se concluir que o número de estados necessários para satisfazer uma precisão especificada é independente do tamanho do sistema. Devido a isto, a SMC é geralmente a técnica escolhida para estudos probabilísticos em sistemas compostos de grande porte (Pereira & Balu 1992; Rei & Schilling 2008).

2.2 Método de Enumeração de Estados

2.2.1 Aspectos Gerais

O método de EE tem como objetivo estimar índices probabilísticos para um conjunto de estados do sistema usando a definição de valor esperado, ou seja:

$$\tilde{E}[F] = \sum_{j \in \Omega_E} P(x^j) F(x^j) \quad (3)$$

onde:

$P(x^j)$ é a probabilidade do j-ésimo estado do sistema e Ω_E é o conjunto de estados enumerados.

O conjunto Ω_E é definido de acordo com os seguintes critérios:

- i) ordem de contingência: enumerar todas as contingências nas quais o número de componentes fora de serviço é menor ou igual a uma ordem máxima especificada;
- ii) valor mínimo para a probabilidade de um estado: desprezar todos os estados com probabilidades menores do que um valor especificado;
- iii) uma combinação dos critérios (i) e (ii).

A partir dos critérios (i)-(iii), pode-se concluir que a dimensão do conjunto Ω_E tende a ser elevada em sistemas onde as probabilidades dos estados estão dispersas em um grande número de estados. Por e-

xemplo, nos sistemas compostos de geração e transmissão esta dispersão é causada pelos valores elevados das indisponibilidades dos geradores (Pereira & Balu 1992; Rei & Schilling 2008). Consequentemente, o custo computacional da EE tende a ser elevado em estudos probabilísticos de sistemas compostos. Esta desvantagem não reduziu o interesse pelo método de enumeração de estados, pois este método é uma extensão direta do critério N-1 usado em muitas empresas do setor elétrico. Além disso, é possível incorporar a experiência do usuário na seleção dos estados de contingência (Pereira & Balu 1992). Estas características atrativas do método de enumeração de estados motivaram o desenvolvimento de vários melhoramentos neste método, tais como: ordenação de contingências de acordo com a sua severidade (Xia & Meliopoulos 1996), classificação dos estados em ordem decrescente de probabilidade (Liu et al. 2008) e agrupamento de componentes idênticos (Billinton & Kumar 1987). Neste artigo, o agrupamento de componentes idênticos é combinado com a Técnica do Diagrama Espiróide (TDE), proposta por Xia & Meliopoulos (1996), para reduzir o esforço computacional do método de EE. A TDE convencional (enumeração baseada em componentes individuais) e a TDE com agrupamento (enumeração orientada a grupos de componentes idênticos) serão apresentadas nas próximas subseções.

2.2.2 TDE Convencional

No TDE convencional (Xia & Meliopoulos 1996), a lista de contingências é iniciada com o caso-base. Em seguida, todas as contingências de 1ª ordem são adicionadas à lista. Nos estágios seguintes, contingências de ordem superior são geradas a partir de contingências previamente listadas que possuem uma ordem abaixo da ordem desejada. Este procedimento é repetido até que um critério de seleção não possa ser satisfeito, por exemplo: ordem máxima e probabilidade mínima para uma contingência. Neste artigo o TDE é finalizado quando não é possível selecionar um novo estado de contingência que pertença a um conjunto especificado de tipos de falhas nos equipamentos. A TDE convencional é ilustrada na Figura 1 para contingências de até 3ª ordem, em um sistema com seis componentes. Nesta figura, uma contingência é identificada como:

- i) componentes no estado de falha: componentes no caminho entre um quadrado e o quadrado do caso-base;
- ii) ordem: número de componentes no caminho do item (i).

2.2.3 TDE com agrupamento

A TDE com agrupamento também gera novos estados de contingência a partir de eventos de falha previamente adicionados na lista de contingências. Entretanto, os eventos de falha são associados com grupos de componentes idênticos ao invés de compo-

nentes individuais. A TDE com agrupamento é ilustrada na Figura 2. Esta figura mostra todas as contingências para um sistema composto por três grupos de dois componentes idênticos. Na Figura 2 um estado de contingência é identificado como:

- i) o par k/m dentro de um quadrado indica que há m componentes do grupo k fora de serviço.
- ii) uma contingência é definida pelos pares nos quadrados, que pertencem ao caminho entre um dado quadrado e o quadrado do caso base.

A partir da Figura 2, pode-se concluir que o número total de caminhos é igual ao número de contingências de até 6ª ordem, ou seja: $(26+1) = 3^3$. Desta forma, o ganho no número de estados devido ao agrupamento é igual a $2^6/27 = 2,3724$.

O ganho no número de estados, obtido com agrupamento, torna-se mais expressivo quando os números de componentes nos grupos tornam-se elevados. Por exemplo, a Figura 3 mostra o diagrama espiróide com agrupamento, para todos os eventos de falha, de um sistema com seis componentes idênticos. Nesta figura o número de caminhos é sete. Consequentemente, o ganho obtido com o agrupamento é igual a $2^6/7 = 9,1429$.

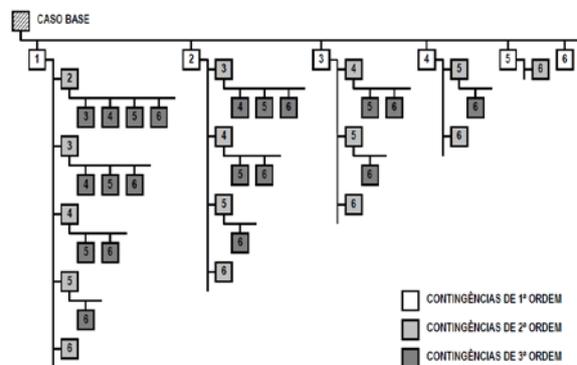


Figura 1. Diagrama espiróide convencional

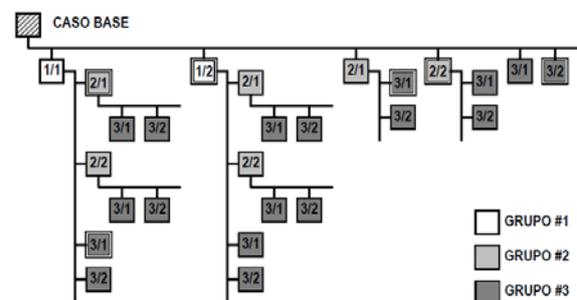


Figura 2. Diagrama espiróide com agrupamento

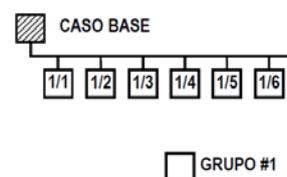


Figura 3. Diagrama espiróide com agrupamento para um sistema composto por seis componentes idênticos

3 Análise de Estabilidade de Tensão para um Estado Selecionado

3.1 Método da Matriz D' (MMD)

Neste artigo o MMD, proposto por Prada et al. (2002), é usado para identificar se um estado do sistema (selecionado via SMC ou EE) tem problemas de instabilidade de tensão causados pela perda de controlabilidade. Este método se baseia no sistema linearizado das equações de fluxo de potência, ou seja:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4)$$

Colocando-se as equações referentes à barra i na parte inferior da matriz J , pode-se reescrever (4):

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde, as submatrizes A , B , C e D são resultantes de uma partição da matriz Jacobiana $[J]$. Considerando-se uma variação incremental ΔP e ΔQ apenas na barra i sob análise ($\Delta P' = \Delta Q' = 0$), é possível eliminar o acoplamento entre $[\Delta \theta' \ \Delta V']$ e $[\Delta \theta_i \ \Delta V_i]$ através da eliminação de Gauss. Aplicando este procedimento em (5) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D'] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde: $[D']_{2 \times 2} = [D] - [C] \cdot [A]^{-1} [B]$

A equação (6) expressa a relação de sensibilidade entre a tensão e as injeções de potência na barra i , levando-se em consideração o restante do sistema. A partir do determinante da matriz D' pode-se concluir que (Prada et al. 2002):

- i) $\det[D'] > 0$: a barra i está operando na região estável da curva PV (metade superior);
- ii) $\det[D'] < 0$: a barra i está operando na região instável da curva PV (metade inferior), isto é, a barra i tem problemas de perda de controlabilidade.
- iii) $\det[D'] = 0$: a barra i está operando no ponto de máximo carregamento (ponta da curva).

3.2 Fluxo de Potência Ótimo (FPO) Não-Linear

A análise de fluxo de potência é o ponto de partida para a análise de estabilidade de tensão. Se o algoritmo de fluxo de potência converge para uma solução, então o MMD é usado para determinar se o estado do sistema tem problemas de instabilidade de tensão causados pela perda de controlabilidade. Caso contrário, a Restauração da Solubilidade das Equações de Fluxo de Potência (RESFLUP) é realizada usando um algoritmo de FPO não-linear. A RESFLUP é realizada através da minimização do corte de carga nas barras, sujeita às seguintes restrições: equações de balanço de potência ativa e reativa, limites sobre as gerações de potência ativa e reativa e

intervalos especificados para as tensões nas barras com geração de potência reativa. Neste problema de fluxo de potência ótimo não-linear, as seguintes ações de controle foram usadas na RESFLUP: despacho de geração de potência ativa, ajustes nas tensões terminais de barras com geração de potência reativa e corte de carga (como último recurso). O problema de FPO associado com a RESFLUP foi resolvido usando o algoritmo de Pontos-Interiores proposto por Granville, Mello & Melo (1996).

4 Avaliação de um Estado Selecionado

A análise de um estado selecionado na APET, baseada na EE ou na SMC, é realizada de acordo com os seguintes passos:

i) configuração da rede: identificação de problemas de perda de conectividade (ilhamentos) causados por contingências nos circuitos.

ii) Despacho de carga/geração: cálculo da potência de saída dos geradores para cada ilha sujeito as seguintes restrições: equação de balanço de potência ativa e limites na potência de saída dos geradores.

iii) Compilação de dados para o estudo de fluxo de potência: este passo está associado com as seguintes tarefas: definição dos tipos de barras (PV, PQ e V θ), eliminação de barras isoladas e ilhas incompatíveis (ilhas sem carga e geração). etc.

iv) Fluxo de potência: cálculo das tensões nodais para o estado selecionado usando o Método de Newton-Raphson.

v) RESFLUP: eliminação de problemas de convergência do Método de Newton-Raphson usando o algoritmo de FPO não linear.

vi) Análise de Estabilidade de Tensão com o MMD: identificação de estados instáveis associados com a perda de controlabilidade usando o MMD.

5 Índices propostos para a APET

O principal índice usado na APET é o RIT. O RIT expressa a probabilidade de ocorrência de estados do sistema com problemas de instabilidade de tensão. Neste artigo um estado instável é definido como aquele no qual as equações de fluxo de potência não tem solução (ausência de solubilidade) ou $\Lambda_{\min}^j \leq 0$ (perda de controlabilidade), onde Λ_{\min}^j é o valor mínimo de $\det[D']$ para todas as barras PQ e PV no estado j do sistema. Além do RIT, a APET proposta neste artigo se baseia também na probabilidade dos estados de robustez (Leite da Silva et al. 2008). A análise de robustez tem como objetivo estabelecer uma relação entre a análise probabilística e a operação de sistemas de potência, que é tradicionalmente dominada por critérios determinísticos tais como o N-1. Esta relação se baseia na definição de estados de robustez, que são similares aos estados usados na análise de segurança de sistemas de potência. Neste artigo o critério utilizado para definir os

estados de robustez foi à ocorrência de problemas de instabilidade de tensão. Este critério foi selecionado devido a sua utilização em estudos de segurança de tensão realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (2007). Usando-se este critério é possível definir os seguintes estados de robustez:

- i) **Estado Saudável:** as equações de fluxo de potência têm uma solução e $\Lambda_{\min}^i > 0$;
- ii) **Estado Marginal:** as equações de fluxo de potência têm uma solução e $\Lambda_{\min}^i \leq 0$;
- iii) **Estado de Emergência:** as equações de fluxo de potência não têm uma solução, mas é possível realizar a RESFLUP sem usar corte de carga;
- iv) **Estado Colapso:** as equações de fluxo de potência não têm solução e só é possível restaurá-la com corte de carga.

6 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes obtidos com a aplicação dos métodos de EE e SMC na APET. Estes dois métodos foram usados para estimar o RIT e as probabilidades dos estados de robustez no sistema IEEE-MRTS (Bertoldi, Salvaderi & Scalcino 1988). Este sistema foi escolhido devido a sua rede de transmissão ser bastante carregada. Consequentemente, o sistema IEEE-MRTS é adequado para estudos de estabilidade de tensão.

A APET via EE foi realizada considerando-se conjuntos de tipos de falhas:

- i) **conjunto #1:** é composto pelos eventos de falha descritos na Tabela 1;
- ii) **conjunto #2:** é composto pelo conjunto #1 mais as contingências de 4ª ordem com no máximo um circuito fora de serviço;
- iii) **conjunto #3:** é composto pelo conjunto #2 mais as contingências de 5ª ordem envolvendo apenas geradores e circuitos.

Os alcances da enumeração (cobertura do espaço amostral) associados com os conjuntos #1, #2 e #3 são mostrados na Tabela 2. A partir desta tabela, pode-se concluir que o alcance é significativamente melhorado quando contingências de alta ordem são incluídas nos conjuntos de contingências usados pelo método de EE.

Os alcances obtidos pela EE convencional e com agrupamento são idênticos para um mesmo conjunto de contingências. Entretanto, as dimensões do conjunto Ω_E ($|\Omega_E|$) obtidas por estas duas versões do método de EE, para um mesmo conjunto de contingências, são muito diferentes. Os valores de $|\Omega_E|$ obtidos pela EE convencional e com agrupamento são mostrados na Tabela 3 para os três conjuntos de contingências. Além disso, o ganho entre as duas versões do método de EE é mostrado na 4ª coluna da Tabela 3. A partir desta tabela, pode-se concluir que a TDE com agrupamento reduziu significativamente o número de estados de contingência gerados pelo método de EE.

Na avaliação do desempenho da EE, é também importante estimar os tempos computacionais exigidos para simular os conjuntos de falhas #1, #2 e #3. Estes tempos são apresentados na Tabela 4. Os tempos apresentados nesta tabela foram obtidos usando um PC com processador Intel Core quad de 2;4 GHz e 3.25 GB de memória RAM. A partir da Tabela 4, pode-se concluir que a EE com agrupamento é mais rápida que a EE convencional para todos os conjuntos de contingências.

Tabela 1. Tipos de falha para o conjunto #1.

Número de componentes for a deservico			
Compensadores	Geradores	Circuitos	Total
0	1	0	1
0	2	0	2
0	3	0	3
1	0	0	1
0	0	1	1
0	0	2	2
1	1	0	2
0	1	1	2
1	0	1	2
1	2	0	3
0	2	1	3
1	1	1	3

Tabela 2. Alcances da EE para os conjuntos #1, #2 e #3.

Conjunto	Alcance (%)
1	91,7905
2	97,6827
3	99,3417

Tabela 3. $|\Omega_E|$ obtido pela EE convencional e com agrupamento.

Conjunto	EE convencional	EE com agrupamento	Ganho
1	38.709	8.872	4,3631
2	470.439	56.955	8,2598
3	1.219.837	83.918	14,5361

Tabela 4. Tempos computacionais (em minutos) obtidos com a EE convencional e com agrupamento.

Set	EE Convencional	EE com agrupamento	Ganho
1	7,3307	1,6617	4,4116
2	82,7906	9,4664	8,7457
3	151,0622	11,6456	12,9716

Os valores do RIT e das probabilidades dos estados de robustez estimadas pela EE e SMC são apresentados na Tabela 5, onde as quantidades entre parênteses são os erros percentuais (com relação à SMC) entre os índices estimados pela EE e pela SMC.

Os índices da Tabela 5, obtidos via SMC, foram estimados sob as seguintes condições:

- i) a tolerância para a incerteza relativa ($\beta[F]$) é 5%;
- ii) o tamanho máximo da amostra de estados do sistema (NA) é 100,000;
- iii) o erro de previsão de carga é nulo, isto é, a APET é realizada para a condição de pico de carga;
- iv) a indisponibilidade dos equipamentos é representada por um modelo de dois estados.

Tabela 5. Comparação dos índices estimados via SMC e EE.

Índices	EE						SMC
	Conjunto #1		Conjunto #2		Conjunto #3		
RIT	2.1103×10^{-01}	(5.3722%)	2.2091×10^{-01}	(0.9428%)	2.2252×10^{-01}	(0.2218%)	2.2301×10^{-01}
P(Saudável)	7.0687×10^{-01}	(9.0238%)	7.5592×10^{-01}	(2.7117%)	7.7090×10^{-01}	(0.7836%)	7.7699×10^{-01}
P(Marginal)	2.1322×10^{-02}	(1.3798%)	2.1563×10^{-02}	(2.5236%)	2.1652×10^{-02}	(2.9464%)	2.1032×10^{-02}
P(Emergência)	1.8268×10^{-01}	(4.4292%)	1.8983×10^{-01}	(0.6926%)	1.9070×10^{-01}	(0.2352%)	1.9115×10^{-01}
P(Colapso)	7.0260×10^{-03}	(35.1280%)	9.5212×10^{-03}	(12.0902%)	1.0166×10^{-02}	(6.1376%)	1.0831×10^{-02}

A partir da Tabela 5, pode-se concluir que os índices estimados pela EE só são comparáveis com aqueles obtidos via SMC quando contingências de alta ordem são incluídas nos conjuntos de eventos de falha.

A APET no IEEE-MRTS via SMC exigiu a simulação de 36.563 estados. O tempo computacional requerido para avaliar estes estados foi de 3,4289 minutos. As métricas de desempenho da SMC são comparadas com aquelas referentes à EE na Tabela 6. Esta tabela mostra as razões das métricas de desempenho entre os métodos de EE (com o conjunto de contingências #3) e SMC.

Tabela 6. Comparação do desempenho computacional dos métodos de EE e SMC.

Métrica de Desempenho	EE convencional	EE com agrupamento
Número de Estados	33,3626	2,2952
Tempo (minutos)	44,0556	3,3963

A partir da Tabela 6, pode-se concluir que a SMC tem melhor eficiência computacional que a EE na APET. Contudo, o agrupamento de componentes melhorou consideravelmente o desempenho da EE. Por exemplo, a SMC é cerca de 40 vezes mais rápida que a EE convencional. Todavia, a SMC é somente cerca de 3 vezes mais rápida que a EE com agrupamento.

7 Conclusões

Este artigo apresentou um estudo comparativo entre os métodos de EE e SMC na APET do sistema IEEE-MRTS. Este sistema foi usado para estimar o RIT e as probabilidades dos estados de robustez. Os resultados dos testes com a EE e a SMC demonstraram que:

- Os índices estimados pelo método de EE são muito próximos daqueles calculados pelo método de SMC quando contingências de alta ordem são incluídas na lista de contingências usada pelo método de EE.
- O desempenho computacional da SMC na APET é melhor que aquele associado com a EE.
- A TDE do diagrama espiróide com agrupamento causou uma redução significativa nos custos computacionais da EE.

Referências

- Aboreshaid, S. & Billinton, R. (1999) Probabilistic Evaluation of Voltage Stability. *IEEE Trans. Power System*, 14 (1) Fevereiro, pp. 342-348.
- Bertoldi, O., Salvaderi, L., & Scalcino, S. (1988) Monte Carlo Approach in Planning Studies – An Application to IEEE RTS. *IEEE Trans. Power System*, 3 (3) Agosto, pp. 1146-1154.
- Billinton, R. & Allan, R. N. (1992) Reliability Evaluation of Engineering Systems – Concepts and Techniques. 2nd ed. Plenum Press.
- Billinton, R. & Li, W. (1994) Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. Plenum Press.
- Billinton, R. & Aboreshaid, S. (1998) Voltage Stability Considerations in Composite Power System Reliability Evaluation. *IEEE Trans. Power Systems*, 13 (2) Maio, pp. 655-660.
- Granville, S., Mello, J. C. O., & Melo, A. C. G. (1996) Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability. *IEEE Trans. on Power System*, 11 (2) Maio, pp. 1096-1103.
- Kundur, P. (1994) Power System Stability and Control. McGraw-Hill.
- Leite da Silva, A. M., Coutinho, I. P., Zambroni de Souza, A. C., Prada, R. B., & Rei, A. M. (2000) Voltage Collapse Risk Assessment. *Electric Power System Research*, 54 (3) Junho, pp. 221-227.
- Leite da Silva, A. M., Resende, L. C., Manso, L. A. F., & Miranda, V. (2008) Well-being analysis for composite generation and transmission systems based on pattern recognition techniques. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2 (2) Março, pp. 202-208.
- Melo, A. C. G., Mello, J. C. O. & Granville, S. (1997) The Effect of Voltage Collapse Problems in the Reliability Evaluation of Composite Systems. *IEEE Trans. Power Systems*, 12 (1) Fevereiro, pp. 480-488.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (2007) Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos–Procedimentos de Rede–Submódulo 23.3 [Internet], Disponível de: <<http://www.ons.org.br>> [Acessado em 18 de agosto de 2009]
- Overbye, T. J. (1994) A Power Flow Measure for Unsolvability Cases. *IEEE Trans. on Power Systems*, 9 (3) Agosto, pp. 1359-1365.
- Prada, R. B., Palomino, E. G. C., dos Santos, J. O. R., & Pilloto, L. A. S. (2002) Voltage Stability Assessment for Real-Time Operation. *IEE-Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 149 (2) Março, pp. 175-181. quando contingências de alta ordem são incluídas na lista de contingências usada pelo método de EE.
- Rei, A. M. & Schilling, M. T. (2008) Reliability Assessment of Brazilian Power System Using Enumeration and Monte Carlo. *IEEE Trans. on Power Systems*, 23(3) Agosto, pp. 868-876.