



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

#### **GRUPO IV**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA CA E CC - GAT**

#### **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DE SISTEMAS INTERLIGADOS**

**Thatiana Conceição Justino(\*)**  
CEPEL

**Carmen Lucia Tancredo Borges**  
COPPE/UFRJ

**Albert Cordeiro Geber de Melo**  
CEPEL, UERJ

#### **RESUMO**

As técnicas de simulação estocástica geralmente utilizadas nas avaliações da confiabilidade de sistemas interligados e compostos de geração e transmissão são as simulações Monte Carlo sequencial e não-sequencial. Ao longo dos anos, novas técnicas têm sido desenvolvidas no contexto da confiabilidade composta de modo a reduzir o esforço computacional, aproveitando e/ou estendendo as vantagens destes dois tipos de simulação. Entretanto, as novas metodologias ainda não foram aplicadas ao contexto da confiabilidade de sistemas interligados. Deste modo, este trabalho apresenta resultados da aplicação de métodos, outrora desenvolvidos para avaliação da confiabilidade composta, na análise da confiabilidade de sistemas interligados.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Confiabilidade de sistemas interligados, Confiabilidade multi-área, Simulação Monte Carlo, Frequência e duração.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O método de simulação estocástica mais usado para realizar a avaliação da confiabilidade de sistemas interligados (ou multi-área) é a Simulação Monte Carlo. Esta pode ter duas variantes: a sequencial e a não-sequencial. A sequencial representa todo aspecto cronológico da operação do sistema, por isso é a mais indicada em estudos que requerem a representação de cargas variantes no tempo e o cálculo de interrupções contínuas de energia. Entretanto, ela requer um elevado esforço computacional, pois, para o cálculo dos índices de confiabilidade, devem ser analisados todos os estados do sistema amostrados consecutivamente ao longo de um ano. Já na simulação não-sequencial não existe a preocupação com a cronologia da operação do sistema. Ela considera que cada estado do sistema é uma "fotografia" dos estados dos seus componentes, logo, não existe a necessidade de fazer a avaliação de uma realização anual da operação do sistema. Isto possibilita que os índices de confiabilidade usuais, incluindo os de frequência e duração, sejam calculados com um esforço computacional menor que o requerido para a análise sequencial (1,2).

Estas técnicas de simulação também são usadas na avaliação da confiabilidade de sistemas compostos de geração e transmissão, no qual novas técnicas têm sido desenvolvidas de modo a reduzir o esforço computacional, aproveitando e/ou estendendo as vantagens dos dois tipos de simulação citados anteriormente. Duas das principais características consideradas nestes métodos são a evolução cronológica da operação do sistema e a representação de diferentes padrões de carga. Em especial, na década de 90, foram sugeridos dois métodos híbridos de simulação: o pseudo-sequencial (3) e o pseudo-cronológico (4), que reúnem os aspectos desejáveis de ambas simulações para a consideração da interrupção contínua de energia e o cálculo do valor da confiabilidade.

No método pseudo-sequencial a simulação não-sequencial seleciona os estados de falha do sistema e a sequencial é aplicada somente às subsequências de falha formadas pelos estados de falha vizinhos ao estado sorteado originalmente. Usando este método define-se completamente qualquer interrupção no sistema. E assim como na simulação sequencial, esta técnica representa o comportamento da carga do sistema por uma curva cronológica.

A simulação pseudo-cronológica é uma variação da pseudo-sequencial, combinando o método de transição por amostragem de estados do sistema (5) e a simulação não-sequencial. Diferentemente das simulações sequencial e pseudo-sequencial, que utilizam as curvas de carga cronológicas do sistema e de suas áreas (subsistemas), este método utiliza um modelo de Markov não-agregado a múltiplos níveis para representar os comportamentos das cargas.

Mais recentemente, foi proposta uma metodologia que utiliza a simulação não-sequencial com o modelo de carga de Markov não-agregado a múltiplos níveis e um novo processo para estimação do índice de frequência de perda de carga (LOLF – Loss of Load Frequency), denominado Processo de Transição Um Passo a Frente (6). Seu objetivo é representar diferentes padrões cronológicos de carga para cada área do sistema, o que não é possível na simulação não-sequencial tradicional.

A aplicação destes métodos à avaliação da confiabilidade de sistemas compostos de geração e transmissão mostrou que eles podem ser mais rápidos que a simulação sequencial convencional e que os seus estimadores para os índices de confiabilidade são mais eficientes (3,4,6). Entretanto, estes métodos ainda não foram aplicados à avaliação da confiabilidade de sistemas interligados. Deste modo, o objetivo deste trabalho é aplicar e avaliar o desempenho destes métodos no contexto da confiabilidade de sistemas interligados. Para tanto, estes métodos foram implementados no modelo para Análise de Confiabilidade de Sistemas Hidrotérmicos Interligados – CONFINT (7), desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

Atualmente, no modelo CONFINT, o sistema é representado por um modelo multi-área, onde as áreas (subsistemas) do sistema são representadas por nós e as interligações entre elas são representadas por arcos que ligam estes nós, e a simulação Monte Carlo não-sequencial é utilizada para realizar o cálculo dos índices de confiabilidade. Ressalta-se ainda que a incorporação dos métodos citados anteriormente ao CONFINT permitirá a representação do comportamento cronológico das cargas do sistema e de suas áreas.

Para ilustrar esta aplicação, este trabalho apresenta os resultados da avaliação da confiabilidade com os métodos de simulação Monte Carlo (SMC) não-sequencial, sequencial, pseudo-cronológico e não-sequencial com processo de transição um passo a frente. Nesta análise foram utilizados dois estudos de caso: um fictício com duas áreas e outro com quatro áreas baseado no SIN (Sistema Interligado Nacional).

## 2.0 - REPRESENTAÇÃO MULTI-ÁREA DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA (7,8)

Um sistema multi-área pode ser representado por uma *rede linear de fluxos*, onde os nós representam as áreas, e os arcos representam os intercâmbios entre elas. A geração de cada área é modelada como um arco chegando ao nó, proveniente do nó “fonte”, S. Por sua vez, a carga de cada área é representada por um arco que deixa o nó associado a área e entra no nó “sumidouro”, T.

As capacidades associadas a cada arco são variáveis aleatórias, e podem ser obtidas pela combinação dos estados individuais dos *componentes* (geradores e interligações) e patamares de carga. Por exemplo, a capacidade de cada arco de geração é dada pela soma das capacidades disponíveis das unidades geradoras da área correspondente.

Um estado do sistema pode ser representado por um valor  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , onde  $x_k$ , é o estado do k-ésimo componente e  $m$  é o número de componentes. O conjunto de todos os possíveis estados  $x$ , oriundos da combinação de estados dos componentes é denotado por  $X$ , o *espaço de estados*. Todos os componentes são considerados como tendo dois estados, “disponível” e “indisponível” com probabilidades:

$$p(x_k) = \begin{cases} u_k, & \text{se } x_k \text{ está indisponível} \\ 1 - u_k, & \text{se } x_k \text{ está disponível} \end{cases} \quad (1)$$

A classificação de um dado estado em sucesso ou em falha pode ser feita por meio do cálculo do fluxo máximo que passa pelo sistema, no sentido do nó S para o nó T, considerando o balanço de potência em cada nó e as capacidades dos arcos. Se o fluxo máximo é maior ou igual à carga total do sistema, então todas as cargas das áreas estão sendo atendidas e o sistema está operando em sucesso (sem corte de carga). De forma equivalente, se o fluxo máximo é menor que a carga total, significa que pelo menos a carga de uma das áreas não está sendo

atendida em sua plenitude, o que caracteriza um estado de falha. Neste caso, o montante do corte de carga é dado pela diferença entre a carga total e o valor do fluxo máximo.

Uma forma alternativa para resolver este problema é determinar o corte de capacidade mínima entre os nós fonte e sumidouro. Um corte é uma divisão do conjunto de nós (áreas) do sistema em dois subconjuntos disjuntos, um contendo o nó S e o outro contendo o nó T. A capacidade de um corte é dada pela soma das capacidades dos arcos que conectam os dois subconjuntos.

Pode ser demonstrado que o valor do fluxo máximo é igual à capacidade do corte mínimo (10). Uma consequência imediata deste teorema é que o conjunto de arcos que pertence ao corte mínimo corresponde ao ponto crítico do sistema. Em outras palavras, o aumento da capacidade dos arcos que não pertencem ao corte mínimo não ameniza o corte de carga do sistema.

Outra consequência deste teorema é que todos os arcos de carga que pertencem ao corte mínimo estão nos seus limites, isto é, as cargas das áreas correspondentes estão sendo atendidas. Estes arcos de carga correspondem às áreas à esquerda do corte. Por outro lado, as áreas à direita do corte estão "inseguras", isto é, sujeitas ao corte de carga.

Assim, um estado amostrado passa a ser definido como estado de falha quando a capacidade do corte mínimo é menor que a carga total do sistema; o corte de carga é, então, obtido pela diferença entre a carga total e o corte de capacidade mínima. De posse dos cortes do sistema em cada estado amostrado, é possível determinar índices de confiabilidade ao nível de sistema e áreas.

Como será apresentado na próxima seção, diversas técnicas de simulação podem ser utilizadas para selecionar os estados e calcular os índices de confiabilidade.

### 3.0 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE – METODOLOGIA ATUAL DO CONFINT

O problema de calcular os índices de confiabilidade é equivalente ao de calcular o valor esperado de uma dada função-teste (1,8):

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x) \times P(x) \quad (2)$$

onde  $P(x)$  é a probabilidade do estado  $x$  e  $F(x)$  é a função-teste cujo objetivo é verificar se uma configuração específica de capacidades de geração em cada área e capacidades de intercâmbio entre áreas é capaz de suprir adequadamente uma determinada combinação de carga nas áreas. Como o estado do sistema é representado por um vetor cujos componentes são variáveis aleatórias, o teste resultante também será uma variável aleatória.

Os índices básicos de confiabilidade, tais como a probabilidade de perda de carga (LOLP - Loss of Load Probability), o valor esperado de potência não suprida (EPNS - Expected Power Not Supplied) e a frequência de perda de carga (LOLF), podem ser representados através da expressão 2, bastando apenas definir a função  $F(x)$  de forma conveniente (1,2).

A determinação de índices de confiabilidade pode ser realizada a partir de duas representações: por espaço de estado ou cronológica. As técnicas analíticas e a simulação Monte Carlo (SMC) não-sequencial, ambas utilizadas atualmente no modelo CONFINT, utilizam a representação por espaço de estados. Nestes métodos, cada estado selecionado representa "fotografia" da operação do sistema, não sendo possível o detalhamento de aspectos cronológicos da sua operação. Por exemplo, a curva de carga total do sistema é modelada por um diagrama de Markov agregado, sendo as cargas das áreas obtidas por fatores de participação. O índice LOLF pode ser calculado pelo valor esperado da seguinte função-teste  $F(x)$ :

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso} \\ \sum_{j=1}^m \lambda_x^{\text{in}}(j), & \text{se } x \text{ é um estado de falha} \end{cases} \quad (3)$$

onde  $\lambda_x^{\text{in}}(j)$  é a taxa de transição incremental do componente  $j$  no estado de falha  $x$ , definida em (2).

### 4.0 - CÁLCULO DOS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE – METODOLOGIA PROPOSTA PARA O CONFINT

Para algumas aplicações da confiabilidade de sistemas elétricos, torna-se indispensável o conhecimento da evolução cronológica dos estados do sistema, como por exemplo, no cálculo do valor da confiabilidade (LOLC - Loss of Load Cost) que depende fortemente dos valores específicos das durações das interrupções (3).

#### 4.1 Simulação Monte Carlo Sequencial

O método de SMC sequencial permite a representação cronológica dos estados operativos do sistema (11), sendo capaz de calcular, além dos índices de confiabilidade usuais, as durações de cada interrupção. Assim, permite a representação de curvas de carga cronológicas e de distribuições não exponenciais para os tempos de falha e reparo dos componentes. O índice LOLF pode ser calculado pelo valor esperado da seguinte função-teste:

$$F(y_k) = \text{Número de subsequências de falha dentro da série sintética } k \quad (4)$$

onde:

- $y_k$  série sintética dos estados  $x$  do sistema no ano  $k$ ;
- $F(y_k)$  Função-teste para o cálculo dos índices de confiabilidade para a série do ano  $k$ .

#### 4.2 Simulações Pseudo-Sequencial e Pseudo-Cronológica

Além das técnicas de simulação não-sequencial e sequencial, foram desenvolvidos métodos híbridos que combinam características destas duas técnicas: o pseudo-sequencial e o pseudo-cronológico. Estes métodos foram propostos para a avaliação da confiabilidade composta geração e transmissão visando o cálculo mais preciso do valor da confiabilidade. Para tanto, estas simulações procuram preservar aspectos cronológicos da operação do sistema como, por exemplo, o comportamento da carga.

A simulação pseudo-sequencial (3) é um método híbrido no qual a simulação não-sequencial é utilizada para selecionar os estados de falha, e a simulação sequencial é aplicada *somente* às subsequências formadas pelos estados de falha vizinhos ao sorteado originalmente. Este método define completamente qualquer interrupção de energia no sistema através da chamada simulação *forward/backward*. A duração  $D_i$  desta interrupção é dada pela soma das durações dos estados de falha que a formam.

Por sua vez, a simulação pseudo-cronológica (4) é uma variação da simulação pseudo-sequencial, combinando o método de transição de estados do sistema (5) e a simulação Monte Carlo não-sequencial. Ao invés de usar uma curva de carga cronológica, esta técnica utiliza um modelo de Markov não-agregado a múltiplos níveis para representar os comportamentos das cargas do sistema e de suas áreas. Para manter informações cronológicas a respeito da carga, este modelo é composto por um conjunto de  $T$  níveis múltiplos, conectados na mesma ordem em que aparecem no histórico da carga, conforme Figura 1.

O modelo utiliza uma taxa de transição constante  $\lambda_L = 1/\Delta T$ , onde  $\Delta T$  representa a unidade de tempo usada para discretizar o período  $T$ . Para cada uma das  $m$  áreas consideradas, é fornecido o nível de carga por intervalo de tempo. Visto que todas as taxas de transição são iguais, as cargas permanecerão, em média,  $\Delta T$  horas (por exemplo, 1 hora) em cada nível, assim como o período de análise terá, em média,  $T$  horas (por exemplo, 8760 horas).

Pode ser observado que o modelo não-agregado permite reproduzir a seqüência de transições da curva de carga durante a simulação *forward/backward*.

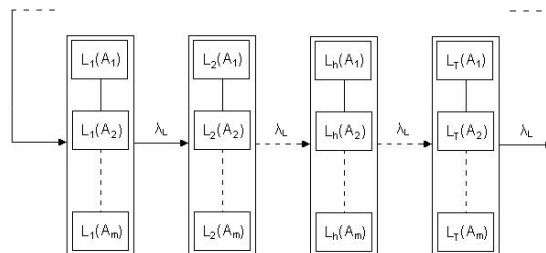


FIGURA 1 – Modelo de Markov não-agregado com múltiplos níveis

Os índices LOLP e EPNS são calculados empregando as mesmas funções-teste da SMC não-sequencial. Já para a determinação do índice LOLF, outras funções são utilizadas. Por exemplo, na simulação pseudo-cronológica o índice LOLF é obtido pelo valor esperado da seguinte expressão 5:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \text{ é um estado de sucesso;} \\ 1/E[D_i], & \text{se } x \text{ é um estado de falha.} \end{cases} \quad (5)$$

### 4.3 SMC Não-Sequencial com Transição um Passo a Frente

Mais recentemente, foi proposto um método para estimação do índice LOLF que combina a simulação Monte Carlo não-sequencial e o modelo de Markov não-agregado a múltiplos níveis. Este método, denominado de Processo de Transição Um Passo a Frente (6) faz uso, para cada estado de falha amostrado, da análise adicional de um novo estado obtido do estado original por meio de uma transição. Com isto, viabiliza a consideração de cargas variantes no tempo utilizando técnicas não-sequenciais. Para isto, é utilizada a seguinte função-teste para o cálculo do índice LOLF:

$$F(x_i) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } x_i \text{ é um estado de sucesso;} \\ \lambda_i^{\text{out}} & , \text{ se } x_i \text{ é um estado de falha e } x_k \text{ é um estado de sucesso;} \\ 0 & , \text{ se } x_i \text{ é um estado de falha e } x_k \text{ é um estado de falha.} \end{cases} \quad (6)$$

onde  $\lambda_i^{\text{out}}$  é o somatório das taxas de transição do estado de falha  $x_i$  para todos estados diretamente ligados a ele, e  $x_k$  é um estado qualquer, encontrado a partir de  $x_i$  por meio de uma única transição.

Este processo de estimação deve simular somente uma das possíveis transições à frente. Por esta razão ele é denominado *processo de transição de estado um passo a frente*.

## 5.0 - APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS

As técnicas de simulação Monte Carlo não-sequencial, sequencial, pseudo-cronológica e não-sequencial com transição um passo a frente foram implementadas no programa CONFINT – Confiabilidade de Sistemas com Hidrotérmicos Interligados – desenvolvido pelo CEPTEL.

Nesta seção, é analisado o desempenho de cada uma das técnicas descritas anteriormente para a estimativa dos índices de confiabilidade, especialmente no caso do índice LOLF. Para isto, é utilizado um sistema fictício com duas áreas (caso 1) e outro baseado no SIN (Sistema Interligado Nacional), com quatro áreas (caso 2).

A SMC sequencial foi adotada como referência para a comparação das técnicas. O critério de convergência utilizado em todos os métodos foi a obtenção do coeficiente de variação (11) do índice LOLF do sistema ( $\beta_{\text{LOLF}}$ ) igual a 1% e 2% para os casos 1 e 2, respectivamente. Um computador Pentium 3.0GHz foi usado em todas as simulações realizadas. Vale ressaltar que o índice de duração média de perda de carga (LOLD – Loss of Load Duration) foi calculado através da razão entre os índices LOLP e LOLF.

A SMC não-sequencial modelou a curva de carga do sistema como um diagrama de Markov agregado 75 e 561 patamares, respectivamente para os casos 1 e 2. Já a simulação sequencial utilizou a curva de carga cronológica, a não-sequencial usou o modelo de Markov agregado e as simulações pseudo-cronológica e não-sequencial com transição um passo a frente utilizaram o modelo de Markov não-agregado.

### 5.1 Caso 1: Sistema com Duas Áreas

Neste sistema, a área 1 possui duas unidades geradoras com capacidades 30 e 20 MW. A área 2 tem uma unidade geradora com capacidade 10 MW. As taxas de falha e reparo em ocorrências/hora são (0.01,0.49), (0.015,0.285) e (0.028,0.372), respectivamente para as unidades de 30, 20 e 10 MW. Os picos de carga das duas áreas são iguais a 20MW. A capacidade da interligação entre as áreas é igual a 20MW, com uma probabilidade de falha igual a  $5.848 \times 10^{-3}$ .

A curva de carga adotada para a área 1 corresponde a 52 repetições da semana de pico de inverno (semana 51) da curva de referência do sistema IEEE RTS (12). Para a área 2 a curva corresponde a 52 repetições da semana 25 (semana de verão) da curva de referência do IEEE RTS. Os valores de carga em p.u. da primeira semana de cada curva são apresentados na Figura 3a.

O primeiro estudo consiste em considerar uma única curva de carga, i.e., a curva de carga resultante do sistema; as cargas de cada área foram obtidas por meio de fatores de participação.

A Tabela 1 apresenta, para cada um dos métodos, os índices de confiabilidade para o sistema. Observa-se que todos os métodos implementados obtiveram desempenhos similares em termos de precisão dos índices estimados, inclusive para o índice LOLF. Nota-se ainda que o menor tempo de processamento foi obtido, como era de se esperar, no método SMC não-sequencial, com *speed up* igual a 2,25 em relação à SMC sequencial.

Na Tabela 2 são apresentados os índices de confiabilidade para o sistema calculados a partir da consideração das curvas cronológicas de cada área. Nesta tabela não são apresentados resultados para a SMC não-sequencial tradicional porque ela não é capaz de representar diferentes curvas de carga por área.

Tabela 1 – Índices Estimados para o Sistema – Curva de Carga do Sistema

	Sequencial	Não-sequencial	Pseudo-cronológico	Não-sequencial c/Trans Um Passo a Frente
LOLP	0.0184	0.0182	0.0182	0.0181
EPNS (MW)	0.136	0.134	0.135	0.133
LOLF (oc. /ano)	76.317	76.067	76.720	76.019
LOLD ( $10^{-2}$ h)	0.024	0.024	0.024	0.024
Nº anos/sorteios	145	937.722	1.030.667	1.805.275
Nº estados analisados	1.400.271	937.722	1.181.441	1.837.934
Tempo de processamento (s)	2.39	1.06	2.37	3.16

Tabela 2 – Índices Estimados para Sistema – Curva de Carga por Área

	Sequencial	Pseudo-cronológico	Não-sequencial c/ Trans. Um Passo a Frente
LOLP	0.0159	0.0156	0.0156
EPNS (MW)	0.095	0.093	0.092
LOLF (oc. /ano)	69.652	68.573	68.713
LOLD ( $10^{-2}$ h)	0.023	0.023	0.023
Nº anos/sorteios	178	1.142.694	1.998.806
Nº estados analisados	1.719.031	1.262.626	2.029.962
Tempo de processamento (s)	2.75	2.66	3.50

Para o caso da Tabela 2, pode-se observar que os métodos implementados obtiveram desempenhos similares em termos de precisão dos índices estimados. De acordo com (4) e (6) esperava-se que as simulações pseudo-cronológica e a não-sequencial com processo de transição um passo a frente apresentassem um tempo de processamento menor que a sequencial. Entretanto, é preciso considerar que a convergência do índice LOLF é mais lenta em métodos não-sequenciais e mais rápida na simulação sequencial. Este comportamento torna-se mais acentuado quanto maior for a frequência de falha do sistema. Em (6) também é mostrado que a simulação não-sequencial com transição um passo a frente pode ser mais rápida que a não-sequencial tradicional, fato que não pôde ser comprovado neste trabalho. Contudo, deve-se considerar que na simulação não-sequencial com processo de transição um passo a frente é possível representar vários padrões de carga, aspecto que influencia bastante os índices de confiabilidade, conforme ressaltado pelos resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

## 5.2 Caso 2: Sistema com Quatro Áreas

Este sistema possui quatro áreas e um nó fictício (área 5), quatro interligações, conforme ilustrado na Figura 2. O sistema de geração é composto de 266 unidades geradoras distribuídas em 78 usinas. A capacidade instalada e o pico de carga de cada área são apresentados na Tabela 3. Ressalta-se que, embora derivado de uma configuração do SIN, foram realizadas modificações a fim de testar o desempenho dos métodos principalmente quanto à estimação do índice LOLF.

A curva de carga adotada para a área 1 corresponde a curva de referência do IEEE RTS (12). Para a área 2, a curva corresponde a 52 repetições da semana de pico de inverno da curva da área 1 (semana 51). Para as áreas 3 e 4 as curvas correspondem, respectivamente, a 52 repetições das semanas 25 e 10 normalizadas da curva da área 1. Os valores de carga em p.u. da primeira semana de cada curva são apresentados na Figura 3b.

A Tabela 4 apresenta os índices de confiabilidade do sistema determinados pelos métodos implementados a partir do uso da curva de carga resultante do sistema.

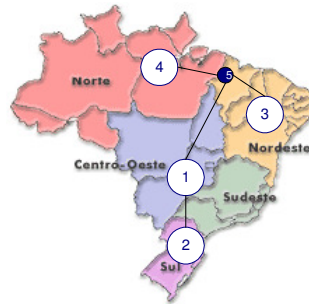
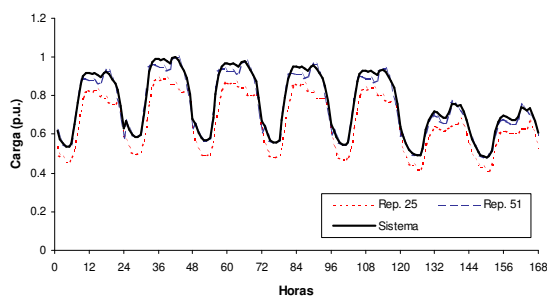


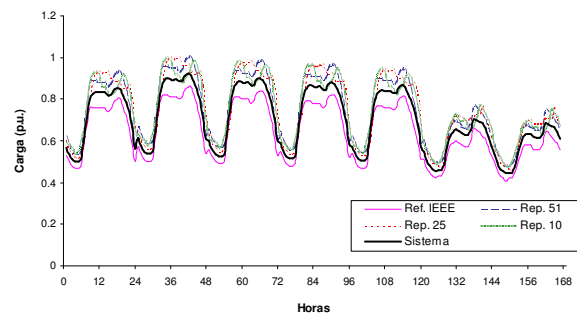
FIGURA 2 – Sistema de quatro áreas do caso de estudo

Tabela 3 – Dados de Geração e Carga

Área	Número de Usinas	Capacidade Instalada (MW)	Pico de Carga (MW)
1	51	20645.6	20000
2	14	6111.6	6300
3	12	9934	9900
4	1	24.6	15
Total	78	36715.8	36215



(a)



(b)

FIGURA 3 – Curvas Semanais de Carga: (a) para o caso 1; (b) para o caso 2

Tabela 4 – Índices Estimados para Sistema – Curva de Carga do Sistema

	Sequencial	Não-sequencial	Pseudo-cronológico	Não-sequencial c/ Trans. Um Passo a Frente
LOLP ( $10^2$ )	0.095	0.10	0.099	0.097
EPNS (MW)	0.361	0.384	0.375	0.370
LOLF (oc. /ano)	4.141	4.382	4.300	4.297
LOLD ( $10^{-2}$ h)	0.023	0.023	0.023	0.023
Nº anos/sorteios	780	4.824.093	4.614.641	8.530.949
Nº estados analisados	10.565.078	4.824.093	4.647.059	8.539.266
Tempo de processamento (min)	37.41	6.85	10.74	28.68

Como pode ser observado na Tabela 4, novamente todos os métodos implementados obtiveram desempenhos similares em termos de precisão dos índices estimados, inclusive para o índice LOLF. Além disso, todos os métodos apresentaram um tempo de processamento menor que o da SMC sequencial. Para obter um mesmo coeficiente variação (2%) para o índice LOLF do sistema, a SMC não-sequencial apresentou um *speed up* de 5,46 em relação a SMC sequencial. Já as simulações pseudo-cronológica e não-sequencial com transição um passo a frente apresentaram *speed us* de 3,48 e 1,30, respectivamente. Estes comportamentos são similares aos obtidos para avaliação da confiabilidade composta de geração e transmissão nas referências (4) e (6).

Na Tabela 5 são apresentados os índices de confiabilidade estimados para o sistema a partir da consideração das curvas de carga por áreas.

Tabela 5 – Índices Estimados para Sistema – Curvas de Carga por Área

	Sequencial	Pseudo-cronológico	Não-sequencial c/ Trans. Um Passo a Frente
LOLP ( $10^2$ )	0.572	0.586	0.584
EPNS (MW)	2.416	2.460	2.530
LOLF (oc. /ano)	19.719	20.057	20.241
LOLD ( $10^{-2}$ h)	0.029	0.029	0.029
Nº anos/sorteios	292	896.966	1.816.294
Nº estados analisados	3.955.643	944.776	1.826.904
Tempo de processamento (min)	14.05	2.69	4.07

Assim como na simulação com a curva de carga resultante do sistema, os índices calculados pelos métodos pseudo-cronológico e não-sequencial com transição um passo a frente são muito próximos aos obtidos a partir da simulação sequencial. Os métodos também se mostraram mais rápidos. Foi possível obter, em relação a simulação sequencial, um *speed up* de 5.22 com a simulação pseudo-cronológica e um *speed up* de 3.45 com o processo de transição um passo a frente. Novamente, estes desempenhos são similares aos obtidos para avaliação da confiabilidade composta de geração e transmissão nas referências (4) e (6).

## 6.0 - CONCLUSÃO

Este artigo discutiu e apresentou os resultados da introdução de novas técnicas de simulação estocástica, desenvolvidas no contexto da confiabilidade composta geração e transmissão, na avaliação da confiabilidade de sistemas interligados (multi-área). Estas técnicas foram introduzidas no modelo CONFINT, tendo sido aplicadas em estudos de caso com dois sistemas-teste, com 2 e 4 áreas. Os resultados indicaram que, quando aplicável, o método de SMC não-sequencial apresentou o melhor desempenho em termos de esforço computacional. Quando se utiliza diferentes curvas de carga por área, a simulação pseudo-cronológica foi a que apresentou melhor desempenho computacional. O modelo CONFINT está, então, apto a representar curvas de carga distintas por área e calcular índices de confiabilidade de forma mais precisa., incluindo o índice LOLF.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MELO, A.C.G., PEREIRA, M.V.F., SILVA, A.M.L., Frequency and Duration Calculations in Composite Generation and Transmission Reliability Evaluation, IEEE PES Summer Meeting, paper No. 91 SM 440-8 PWRS, San Diego, EUA, agosto de 1991.
- (2) MELO, A.C.G., PEREIRA, M.V.F., SILVA, A.M.L., A Conditional Probability Approach to the Calculation of Frequency and Duration Indices in Composite Reliability Evaluation, paper No. 92 SM 425-9 PWRS, IEEE Summer Power Meeting, Seattle, EUA, julho de 1992.
- (3) MELLO, J.C.O., PEREIRA, M.V., SILVA, A.M.L., Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems Based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, agosto de 1994.
- (4) 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, XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, outubro de 1999.
- (5) BILLINTON, R., LI, W., A System State Transition Sampling Method for Composite System Reliability Evaluation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, Nº 3; agosto de 1993.
- (6) MANSO, L.A.F., SILVA, A.M.L., Modelagem de Cargas Variantes no Tempo na Avaliação de Confiabilidade Composta via Simulação Monte Carlo Não-Sequencial, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, setembro de 2002.
- (7) CEPEL, Modelo para Análise de Confiabilidade de Sistemas Hidrotérmicos Interligados – Projeto CONFINT versão 3.17 – Manual de Referência, dezembro de 2006.
- (8) MELO, A.C.G., OLIVEIRA, G.C., CUNHA, S.H.F., PEREIRA, M.V.F., Analytically Based Frequency and Duration Calculations for Multi-Area Reliability Evaluation, 11th Power Systems Computation Conference (PSCC), Avignon, França, 30 agosto – 04 setembro, 1993.
- (9) MELO, A.C.G., LÍCIO, R.V., ARAÚJO, J.L.R., PEREIRA, M.V.F., Sensitivities of Multi-Area Reliability Indices with Respect to Variations of Equipment Failure and Repair Rates – An Analytical Approach, Electrical Power & Energy Systems, Inglaterra, Vol. 20, nº 2, p. 153-159, 1998.
- (10) FORD, L., FULKERSON, D., Flows in Networks, Princeton University Press, 1962.
- (11) KLEIJNEN, J.P.C., Statistical Techniques in Simulation, New York: Marcel Dekker, 1974.
- (12) IEEE RELIABILITY TEST SYSTEM TASK FORCE OF THE APPLICATION OF PROBABILITY METHODS SUBCOMMITTEE, “IEEE Reliability Test System”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, pp. 2047-2054, 1979.