

# Uma Nova Metodologia para Cálculo Probabilístico de Curto-Circuito com Aplicações em Análise de Qualidade de Energia

M. Guia, *Member, IEEE*, A. B. Rodrigues, A. Coelho, T. Almeida, F. Franco, T. Alencar, U. A. Bordalo

*Abstract*-- O principal objetivo deste artigo é propor uma técnica probabilística para calcular correntes de curto-circuito a fim de gerar distribuições de probabilidade do índice SARFI (System Average RMS Variation Frequency Index). A metodologia proposta é baseada na combinação do método de soma de admitâncias em coordenadas de fase com o método Monte Carlo. Esta nova técnica foi testada em um alimentador da Companhia Energética do Maranhão (CEMAR) para gerar distribuições de probabilidade do índice SARFI. Os resultados do teste demonstram que o modelo proposto é uma ferramenta robusta para previsões estocásticas de Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMT).

*Index Terms*--Método de Monte Carlo, Planejamento do Sistema de Distribuição de Energia, Qualidade de Energia, Correntes de Curto-Circuito.

## I. NOMENCLATURA

$n$  Número de barras do sistema;  
 $Y_{LK}$  e  $J_{LK}$  Matriz admitância (3x3) e o vetor injeção de correntes (3x1) associados à barra  $k$ , respectivamente. A matriz admitância  $Y_{Lk}$  é igual ao somatório das admitâncias de carga, susceptâncias shunts e admitâncias de faltas conectadas à barra  $k$ ;  
 $Y_{E_k}, J_{E_k}$  Matriz admitância equivalente (3x3) e o vetor equivalente de injeções de correntes nas fases (3x1) associados à barra  $k$ , respectivamente;  
 $I$  Matriz identidade (3x3);  
 $ZS_{ik}$  Matriz impedância primitiva (3x3) do ramo  $i$ - $k$ ;  
 $Zp_{KL}$  Matriz impedância primitiva (3x3) do ramo  $k$ - $l$ ;  
 $\bar{Z}p_{KL}$  Matriz impedância primitiva normalizada (3x3) dada em  $\Omega$ /milha;  
 $V_k$  Vetor tensão de fases (3x1) para a barra  $k$  ;  
 $d$  Comprimento do ramo  $k$ - $l$ ;  
 $x$  Distância entre o nó de falta e o nó inicial da linha que sofreu a falta.  
 $Y_f$  Matriz admitância de falta (3x3). if needed, should precede the Introduction.

## II. INTRODUÇÃO

ATUALMENTE, as concessionárias de energia elétrica vem recebendo muitas reclamações devido problemas de qualidade de energia associados com interrupções e AMT. A principal razão para isso é o uso crescente do uso de novos equipamentos em todos os setores (residencial, comercial e industrial), que são mais sensíveis às variações de tensão [1]. Portanto, é de grande importância que se estude os problemas de qualidade de energia associados com os AMT. O propósito desses estudos é calcular índices quantitativos para AMT e analisar suas características. As companhias de energia elétrica podem usar os resultados desses estudos para avaliar o nível de desempenho do sistema quando submetido a AMT e também para estudar alternativas de configurações que amenizem os seus efeitos.

Atualmente, a avaliação quantitativa de AMT é realizada através de duas técnicas: medição do desempenho passado do sistema (monitoramento) e previsão do desempenho futuro do sistema (técnicas probabilísticas) [2]. A técnica de monitoramento dos AMT aplicada nas redes de distribuição é o processo em que os dados são armazenados e analisados. Essa análise fornece informações importantes sobre os AMT. Entretanto, quando há mudanças no sistema, tais como, novos procedimentos operacionais ou instalação de novos dispositivos de proteção, os dados coletados no monitoramento não podem mais representar o desempenho atual do sistema. Como as faltas são as principais fontes de AMT e estas ocorrem aleatoriamente no sistema, o monitoramento de uma simples área exige um longo tempo para ser completado.

Nas previsões do desempenho futuro do sistema, duas técnicas probabilísticas são usadas: a técnica analítica e a simulação estocástica [2]. A técnica analítica representa o sistema através de modelos matemáticos que estimam índices de confiabilidade ou índices de qualidade de energia usando soluções matemáticas diretas. Existe uma metodologia amplamente usada chamada de método das posições de falta [3], que estima a frequência de AMT nas redes elétricas. Inicialmente, esta técnica divide o sistema em pequenas partes e associa cada parte a uma posição de falta. Além disso, cada uma dessas partes tem uma taxa de falha proporcional ao comprimento dessas respectivas partes. Em seguida, as correntes de falta são calculadas para um curto-circuito em

---

Este trabalho foi financiado pela FAPEMA (Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Maranhão), ELETRONORTE (Centrais Elétricas do Norte do Brasil SA).

M. Guia ([guia@dee.ufma.br](mailto:guia@dee.ufma.br)), A. B. Rodrigues ([nebulok\\_99@yahoo.com](mailto:nebulok_99@yahoo.com)), A. Coelho ([acoelho@dee.ufma.br](mailto:acoelho@dee.ufma.br)), T. Almeida ([tomashugoribeiro@yahoo.com.br](mailto:tomashugoribeiro@yahoo.com.br)), F. Franco ([felipenfranco@gmail.com](mailto:felipenfranco@gmail.com)), T. Alencar ([tiagoalen@gmail.com](mailto:tiagoalen@gmail.com)), U. A. Bordalo ([ulisses.bordalo@col.cemar-ma.com.br](mailto:ulisses.bordalo@col.cemar-ma.com.br)).

cada posição de falta, usando o modelo de análise de falta. Finalmente, a frequência esperada de AMT, com magnitude especificada e/ou duração, é calculada. Os valores médios demonstram a severidade dos AMT. Entretanto, pode existir uma variação significativa em torno do valor médio de um índice probabilístico. Essa variação pode ser observada gerando-se funções de distribuição de probabilidade (FDPs) dos AMT. A FDP pode também ser usada para estimar o risco de violação de metas, definida por agências reguladoras, associadas com AMT.

Normalmente, as FDPs associadas com os AMT são geradas usando a simulação Monte Carlo (SMC) [4]-[6]. A principal vantagem desta técnica é que ela é capaz de modelar características complexas do sistema que não podem ser modeladas pelas técnicas analíticas. O principal objetivo deste artigo é desenvolver uma metodologia probabilística de curto-circuito (PCC) para gerar a FDP associada com o índice SARFI (System Average RMS Variation Index). A metodologia proposta se baseia na combinação da SMC com o método de soma de admitâncias em coordenadas de fase. Esta combinação permite que as seguintes características aleatórias de um estado de falta sejam incluídas na geração da FDP do índice SARFI: tipo de falta, fases envolvidas na falta, e a posição da falta. A metodologia PCC proposta foi aplicada para gerar a FDP do índice SARFI em uma rede de distribuição da Companhia Energética do Maranhão (CEMAR).

O restante deste artigo está organizado como segue. A seção III mostra a metodologia usada para calcular as correntes de falta. A seção IV descreve a modelagem das características aleatórias das faltas através da SMC. A seção V mostra a metodologia PCC usada para gerar a FDP do SARFI. Os resultados estão ilustrados na seção VI. As conclusões gerais são dadas na seção VII.

### III. CÁLCULO DAS CORRENTES DE FALTA

O cálculo das correntes de falta pode ser realizado usando o método de componentes simétricas [7] ou o método de coordenadas de fase [8], [9]. A princípio, o método de componentes simétricas não pode ser aplicado diretamente aos sistemas de distribuição. Esta restrição é devido à característica desbalanceada das redes de distribuição. Entretanto, o método de componentes simétricas fornece resultados com precisão aceitável quando aplicado em redes de distribuição com cargas desbalanceadas ou com linhas não transpostas. Porém, o método de componentes simétricas requer que os circuitos de seqüência para cada componente sejam obtidos. Além disso, há dificuldades em se obter os circuitos de seqüência de algumas conexões de transformadores, tais como a conexão Scott-T. Por outro lado, o método de coordenadas de fase representa explicitamente todas as fases da rede elétrica e suas respectivas tensões, correntes e impedâncias sem necessidade de se obter os circuitos de seqüência. Devido a isto, o método de coordenadas de fase foi usado neste artigo para calcular as correntes de falta.

Basicamente, há quatro versões do método de coordenadas de fase usadas para análise de faltas em redes de distribuição: método de Gauss-Zbus [10], método de Kersting [11], método de compensação híbrida [12] e o método de soma de admitâncias [13]. Neste artigo, as correntes de falta foram calculadas usando o método de soma de admitâncias (MSA). Esta técnica foi usada devido ser esta técnica capaz de modelar precisamente as cargas com características de impedância e susceptância shunt constante. Além disso, o MSA também tem baixo custo computacional devido ao uso do algoritmo “backward-forward sweep” para estimar as correntes de falta [14].

#### A. Revisão do Método de Soma de Admitâncias (MSA)

No MSA, o processo de cálculo das tensões nodais é feito usando o algoritmo “backward-forward sweep”, como segue [13], [14].

#### 1. Ajuste dos valores iniciais:

$$YE_k = YL_k; \quad k = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$JE_k = JL_k; \quad k = 1, \dots, n \quad (2)$$

2. **Backward sweep ( $k = n, \dots, 1$ ):** os valores de  $YE_k$  e  $JE_k$  são calculados usando o circuito equivalente mostrado na Figura 1.

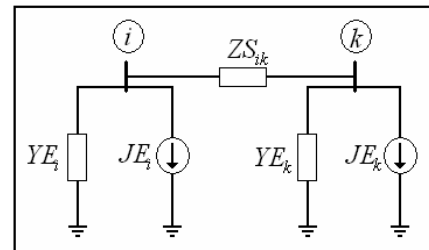


Fig. 1. Circuito equivalente usado no backward-sweep

$$D_k = (I + ZS_{ik} YE_k)^{-1}; \quad (3)$$

$$YE_i(novo) = YE_i(antigo) + YE_k \cdot D_k; \quad (4)$$

$$JE_i(novo) = JE_i(antigo) + (I - YE_k D_k ZS_{ik}) JE_k; \quad (5)$$

Em (4) e (5) a palavra “novo” representa o equivalente após o processamento do ramo (i-k) e a palavra “antigo” representa o equivalente antes do processamento do mesmo ramo (i-k).

3) **Forward sweep ( $k = 1, \dots, n$ ):** os valores de tensão nodal são calculados usando o circuito equivalente mostrado na Figura 2.

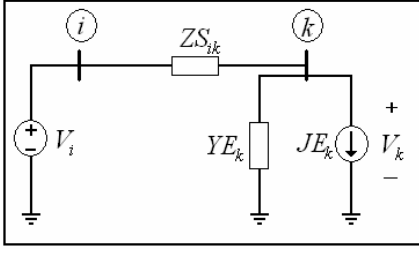


Fig. 2. Circuito equivalente usado para calculo das tensões nodais.

$$\mathbf{V}_K = \mathbf{D}_K \cdot (\mathbf{V}_i - \mathbf{ZS}_{ik} \cdot \mathbf{JE}_k); \quad (6)$$

### B. Revisão do Modelo para Falta na Rede Primária

Esta seção apresenta uma revisão da metodologia proposta em [14] para estimar as correntes de falta causadas por curto-circuito nas redes primárias. Quando uma falta ocorre na rede primária, um novo nó F é adicionado à rede elétrica devido à conexão da admitância de falta em um ponto ao longo da rede primária [14]. A introdução de um novo nó na rede elétrica modifica a estrutura de dados usada no algoritmo de “backward-forward sweep”. Devido a isto, para cada falta simulada, a estrutura de dados do algoritmo tem que ser reconstruída. Conseqüentemente, o custo computacional pode tornar-se alto em aplicações que exige um grande número de simulações de falta, tais como coordenação de proteção. Uma alternativa para solucionar este problema é eliminar o nó adicional introduzido pela conexão da admitância falta pelo método de redução de Kron, que gera um circuito equivalente reduzido da rede elétrica. Portanto, após a eliminação do nó de falta, a linha em que o evento de falta ocorreu pode ser representada pelo equivalente  $\pi$  mostrado na Figura 3.

Neste circuito,  $Zser_{KL}$  é a nova matriz impedância primitiva do ramo  $k-l$ . Esta matriz pode ser obtida pela seguinte equação [12]:

$$\mathbf{Zser}_{KL} = \mathbf{x}(\mathbf{d} - \mathbf{x}) \cdot \bar{\mathbf{Z}}_{p_{KL}} \cdot \mathbf{Y}_{FF} \cdot \bar{\mathbf{Z}}_{p_{KL}} \quad (7)$$

onde:

$$\bar{\mathbf{Y}}_{p_{KL}} = (\bar{\mathbf{Z}}_{p_{KL}})^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_{FF} = \frac{\bar{\mathbf{Y}}_{p_{KL}}}{\mathbf{x}} + \frac{\bar{\mathbf{Y}}_{p_{KL}}}{(\mathbf{d} - \mathbf{x})} + \mathbf{Yf} \quad (9)$$

Devido a eliminação do nó de falta (F), as admitâncias shunt  $\mathbf{Ysh}_K$  e  $\mathbf{Ysh}_L$  são adicionadas aos nós k e l, respectivamente. Essas admitâncias shunts são calculadas pelas seguintes equações:

$$\mathbf{Ysh}_K = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{x}} \cdot \bar{\mathbf{Y}}_{p_{KL}} \cdot \mathbf{Y}_{FF}^{-1} \cdot \mathbf{Yf} \quad (10)$$

$$\mathbf{Ysh}_L = \frac{\mathbf{I}}{(\mathbf{d} - \mathbf{x})} \cdot \bar{\mathbf{Y}}_{p_{KL}} \cdot \mathbf{Y}_{FF}^{-1} \cdot \mathbf{Yf} \quad (11)$$

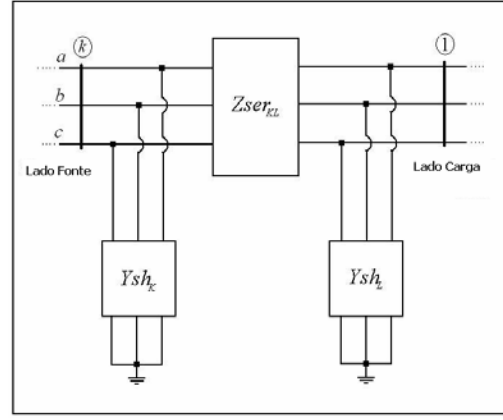


Fig. 3. Circuito  $\pi$  equivalente de pós-falta.

A representação da matriz admitância de falta  $\mathbf{Yf}$ , nas equações (9)-(11), são dadas em [11] para diferentes tipos de faltas.

Após serem avaliados todos os nós da rede pós-falta pelo MSA, a corrente de falta  $\mathbf{If}$  pode ser calculada como segue:

$$\mathbf{If} = \mathbf{Yf} \cdot \mathbf{V}_F \quad (12)$$

onde:

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{Y}_{FF}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{Y}}_{p_{KL}} \left[ \frac{\mathbf{V}_K}{\mathbf{x}} + \frac{\mathbf{V}_L}{(\mathbf{d} - \mathbf{x})} \right] \quad (13)$$

### IV. CURTO-CIRCUITO PROBABILÍSTICO USANDO SIMULAÇÃO MONTE CARLO

A principal vantagem da análise PCC baseada no método de SMC é que ela dispõe de um modelo que representa vários aspectos associados com o comportamento do sistema, que não podem ser representados através de um modelo analítico. A técnica de SMC pode ser usada de duas formas: simulação seqüencial e não-seqüencial. Na SMC seqüencial, os estados do sistema são amostrados em ordem cronológica. Esta técnica considera a ordem nas quais as transições de estado ocorrerem. Na SMC não-seqüencial, os estados do sistema são amostrados aleatoriamente sem considerar a ordem nas quais as transições ocorrem. Neste artigo, a técnica de SMC tem sido usada para selecionar o componente de falta, o tipo e as fases da falta e a localização da falta. Como essas variáveis aleatórias não apresentam variações cronológicas, a SMC não-seqüencial foi escolhida para análise de PCC.

O algoritmo de PCC usado neste artigo para gerar a FDP do índice SARFI está resumido nos seguintes passos:

**Passo 1:** Obter o número de faltas ocorridas para um componente selecionado (seção linha do alimentador). Neste artigo, foi considerado que todos os componentes do sistema de distribuição estão operando no seu período de vida útil, isto é, a taxa de falha é constante. Nesses casos, o número de falhas em um dado período de estudo segue o processo de Poisson [15]. Desta forma, o número de faltas para um dado componente é amostrado usando um gerador de número aleatório que segue a distribuição de Poisson. Os parâmetros de entrada para esse gerador são a taxa de falha do componente e o período de estudo (usualmente 1 ano).

**Passo 2:** Selecionar a localização da falta na rede primária defeituosa usando um gerador de números aleatórios uniforme.

**Passo 3:** Selecionar o tipo de falta usando um gerador de números aleatórios uniforme. Os intervalos que determinam o tipo de falta a ser simulado são dados pelas probabilidades de ocorrência dos tipos de curto-circuito mostrados na Tabela I. A Figura 4 ilustra esses intervalos detalhadamente.

**Passo 4:** Selecionar as fases envolvidas na falta usando um gerador de números aleatórios uniforme. Na Figura 5 são apresentados os intervalos, que determinam as fases envolvidas durante faltas bifásicas.

**Passo 5:** Modificar os parâmetros da seção da rede primária defeituosa usando as metodologias propostas na Seção II deste artigo.

**Passo 6:** Calcular as correntes de curto-circuito pelo MSA.

**Passo 7:** Repetir os passos 3-7 para o número de faltas obtido no passo 2.

**Passo 8:** Repetir os passos 2-7 para cada componente (seção da rede primária) do sistema.

**Passo 9:** Verificar a regra de parada.

**Passo 10:** Repetir os passos 2-10 para o número máximo de simulações determinado.

TABELA I  
PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DOS CURTOS-CIRCUITOS

Curto-circuito	Ocorrência (%)
Trifásica Terra	1,5
Trifásica	1,5
Bifásica Terra	6,0
Bifásica	10,0
Monofásica	81,0

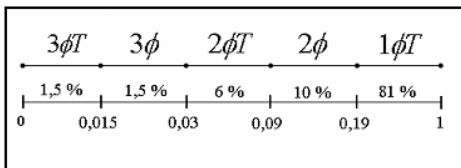


Fig. 4. Representação dos intervalos que determinam o tipo de falta.

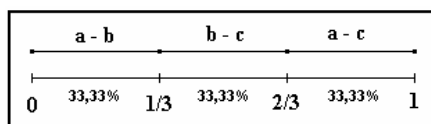


Fig. 5. Intervalos para fases envolvidas em faltas bifásicas.

A Figura 6 mostra o fluxograma do algoritmo proposto para estimar as correntes de falta em redes de distribuição radial usando o método de SMC.

#### V. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA EM ESTUDOS DE QUALIDADE DE ENERGIA

O índice  $SARFI_x$  representa o número médio de variações RMS que ocorreram em determinado período de tempo por consumidor servido. Os distúrbios especificados são aqueles com uma magnitude menor do que  $x$  para AMT ou maior do que  $x$  para sobretensões [1].

Nesta nova metodologia para cálculo de PCC, o índice  $SARFI_x$  para a simulação “ $i$ ” é calculado como segue:

$$SARFI_x(S_i) = \frac{\sum_{j=1}^{NLP} f_j^x(S_i) \times N_j}{N_T} \quad (14)$$

onde:

$x$  = limite da tensão RMS em porcentagem relativo ao cenário de pré-falta;

$S_i$  = simulação “ $i$ ”;

$NLP$  = número de pontos de carga do sistema;

$f_j^x(S_i)$  = número de variações momentâneas de tensão com magnitudes acima de  $x$  por cento (sobretensões) ou abaixo de  $x$  por cento (AMT) ocorridos em um ponto de carga  $j$  na simulação “ $i$ ”;

$N_j$  = número de consumidores do ponto de carga  $j$ ;

$N_T$  = número total de consumidores que estão sendo atendidos pelo sistema em análise.

A regra de parada que tem sido usada no método de SMC para estimar as variações de tensão é a precisão pré-especificada. Esta regra de parada consiste em gerar cenários de faltas até que a incerteza relativa ( $\beta$ ) do parâmetro estimado ( $SARFI_x$ ) seja menor que a tolerância especificada. A incerteza relativa é calculada como segue:

$$\beta(SARFI_x) = \frac{\sigma(SARFI_x)}{E(SARFI_x) \times \sqrt{n}} \quad (15)$$

Onde:

$E(SARFI_x)$  é o valor médio do índice  $SARFI_x$ ;

$\sigma(SARFI_x)$  é o desvio padrão do índice  $SARFI_x$ ;

$n$  é o número de simulações realizadas.

$$E(SARFI_x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SARFI_x(S_i) \quad (16)$$

$$\sigma(SARFI_x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [SARFI_x(S_i) - E(SARFI_x)]^2} \quad (17)$$

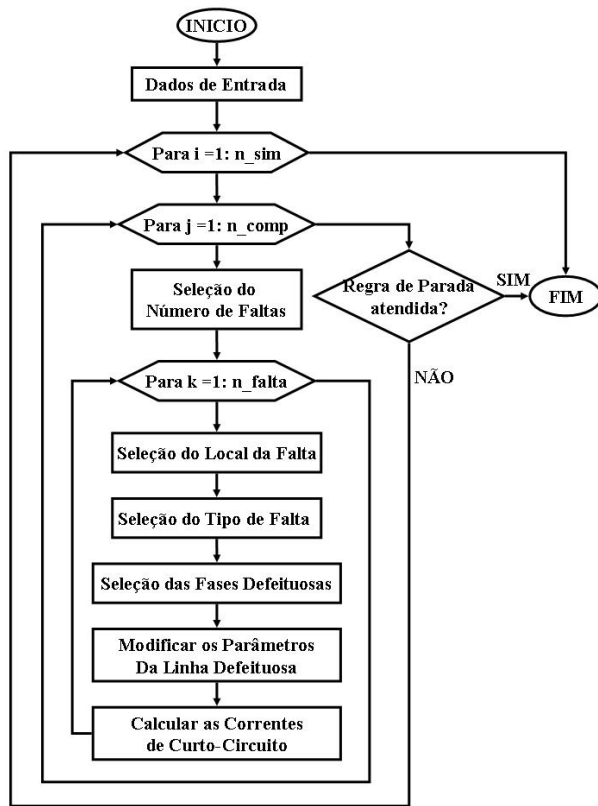


Fig. 6. Fluxograma do algoritmo proposto para análise de PCC, onde  $n_{sim}$  é o número de simulações,  $n_{comp}$  é o número de componentes e  $n_{falta}$  é o número de falhas.

## VI. RESULTADOS

O algoritmo proposto para o cálculo de PCC com aplicações em análise de qualidade de energia (cálculo do SARFI) foi testado em um sistema de distribuição da Companhia Energética do Maranhão (CEMAR), mostrado na Figura 7. As principais características deste sistema são apresentadas na Tabela II.

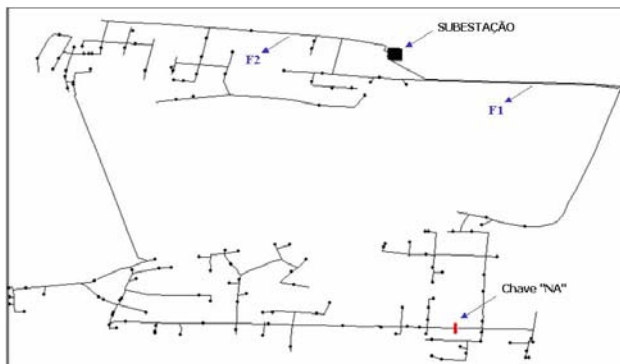


Fig. 7. Diagrama simplificado on-line do sistema teste.

TABELA II  
CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA TESTE

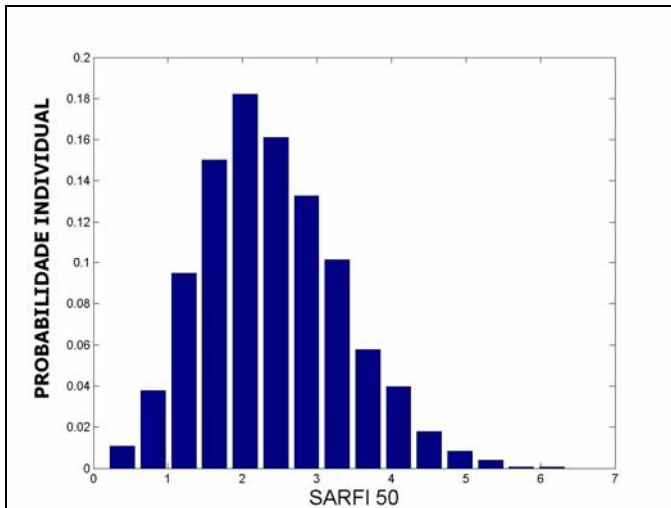
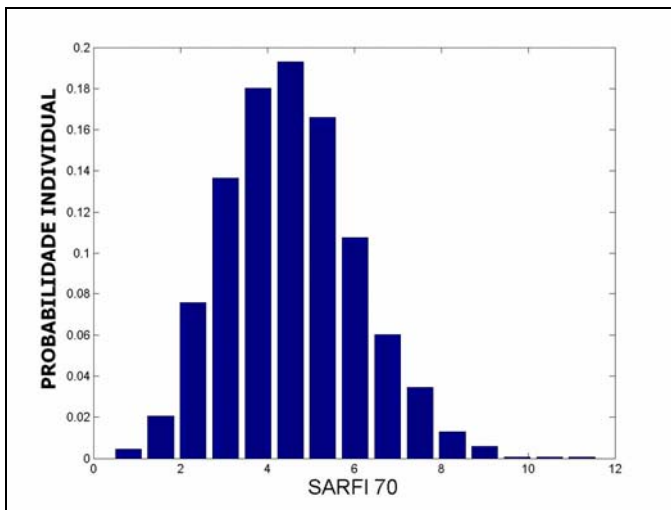
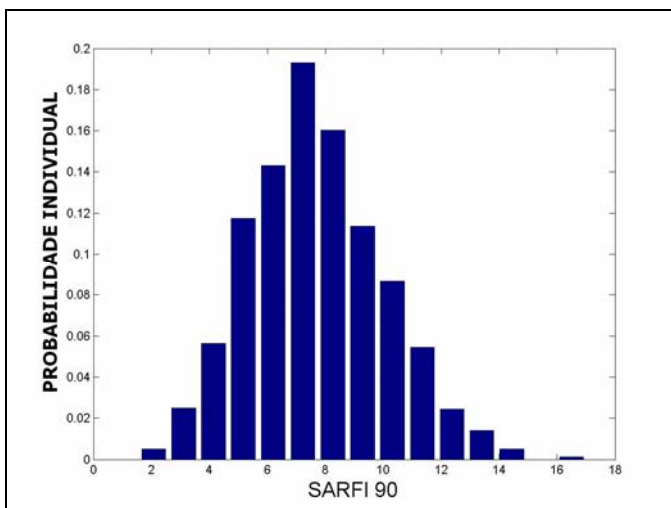
Número de consumidores	4295
Pico de carga [MW]	8.545
Número de alimentadores	2
Número de pontos de carga	138
Comprimento total [km]	15.683
Número de seções linha	412
Número de dispositivos de proteção	47
Número de chaves seccionadoras	19

Neste artigo, a metodologia proposta foi aplicada para estimar o índice SARFI com  $x$  igual a 10% ( $SARFI_{10}$ ), 50% ( $SARFI_{50}$ ), 70% ( $SARFI_{70}$ ) e 90% ( $SARFI_{90}$ ). Estes limites de SARFI foram obtidos a partir de [1]. O índice SARFI para o sistema teste foi simulado usando as seguintes considerações:

- A impedância de falta igual a  $1.0 + j0.0 \Omega$ ;
- Todas as cargas foram modeladas como impedância constante;
- A taxa de falha total dos segmentos de linha da rede primária é 1.5 (falhas/ano. milha);
- A precisão pré-especificada usada na regra de parada é 1,0% para cada índice  $SARFI_x$  estimado;
- O período de estudo foi de 1 ano.

O número total de simulações realizadas no sistema teste para alcançar a precisão especificada foi 1559. O tempo de execução das simulações foi cerca de 545,5 segundos (9,09 minutos). Isto significa um tempo de execução associado com cada simulação em cerca de 349,903 milissegundos. Este tempo de execução foi medido em um computador Pentium 1.6 GHz com 512 MB de RAM. Estes resultados mostram que o método proposto é muito eficiente computacionalmente para aplicações em grandes redes de distribuição.

As Figuras 8-10 mostram os histogramas associados com o índice  $SARFI_{50}$ ,  $SARFI_{70}$  e  $SARFI_{90}$ , respectivamente. Durante a simulação com o sistema teste, não houve nenhuma ocorrência de AMT abaixo de 10% da tensão de pré-falta. Portanto, o índice  $SARFI_{10}$  para este sistema é igual a zero. A Tabela III apresenta algumas estatísticas associadas com estes índices. A partir desta tabela, pode ser concluído que cada consumidor do sistema teste experimentalmente, durante um período anual, cerca de 2,4, 4,5 e 7,7 AMT menores que 50%, 70% e 90% das tensões de pré-falta, respectivamente. A Tabela III apresenta também alguns percentis (25°, 50°, 75°) para as distribuições do índice SARFI. O 25° percentil (primeiro quartil) é o valor que excede, em magnitude, um quarto (25%) dos valores da amostra e é excedido por três quartos (75%) desses valores. Os 50° e 75° percentis são denominados de mediana e terceiro quartil, respectivamente. Portanto, a partir da Tabela III, pode ser concluído que 25% dos valores do índice  $SARFI_{50}$  são menores do que 1,7145, 50% dos valores do índice  $SARFI_{50}$  estão abaixo de 2,3027 e 75% dos valores do índice  $SARFI_{50}$  são inferiores a 2,9996. Esses resultados demonstram que houve uma variação considerável dos valores esperados do índice SARFI. Devido a isto, pode-se afirmar que o cálculo do índice SARFI deve se basear em distribuições de probabilidade.

Fig. 8. Probabilidade individual do SARFI<sub>50</sub>Fig. 9. Probabilidade individual do SARFI<sub>70</sub>Fig. 10. Probabilidade individual do SARFI<sub>90</sub>TABELA III  
ESTATÍSTICAS DO ÍNDICE SARFI

SARFI	Valor Médio	Percentil das distribuições de SARFI		
		25°	50°	75°
50	2.3916	1.7145	2.3027	2.9996
70	4.5507	3.4814	4.4854	5.5323
90	7.6978	6.0387	7.5714	9.1374

## VII. CONCLUSÃO

Neste artigo foi descrito uma nova técnica probabilística de cálculo de curto-circuito para gerar as FDPs do índice SARFI. Esta técnica se baseia na combinação dos métodos de soma de admitâncias em coordenadas de fase com o método de SMC não-sequencial. Os resultados demonstram que o método proposto é uma ferramenta robusta para estudos de qualidade de energia em grandes redes de distribuição.

Esta nova metodologia permite a geração de informações associadas com o índice SARFI, tais como média, PDF's e percentis associado com estas distribuições de probabilidade. Estes resultados comprovam que há uma variação considerável do índice SARFI em torno de seus valores médios. Portanto, o cálculo do índice SARFI não pode se basear apenas em valores médios.

Estes resultados motivam a extensão da metodologia para incluir a resposta do sistema de proteção e fontes de geração de distribuídas nos estudos de qualidade de energia.

## VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng<sup>o</sup>. Márcio Nazareno da CEMAR, pelo fornecimento dos dados para a realização deste trabalho.

## IX. REFERÊNCIAS

- [1] Sato F., Garcia A. V., Monticelli A. "Parallel Implementation of Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Approach", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, No 2, pp 826-832, May 1994.
- [2] Sato F., Garcia A. V., Monticelli A., Baleiro Alves A. C., "Distributed Short-Circuit Analysis in Heterogeneous Computer Networks", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 22, Issue 2, pp 129-136, Feb. 2000.
- [3] Balouktis A., Tsanakas D., Vachtsevanos G., "Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulations and Analytical methods", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PWRS-1, No. 3, Aug. 1986.
- [4] El-Kady M.A., "Probabilistic Short-Circuit Analysis by Monte Carlo Simulations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
- [5] El-Kady M. A., Ford G. L., "An Advanced Probabilistic Short-Circuit Program", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
- [6] M.A. Laughton, "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co-ordinates. Part I: System Representation in Phase Frame of Reference", *Proc. IEEE*, 115, (8), pp. 1163-1172, 1968.
- [7] M.A. Laughton, "Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Co-ordinates. Part II: Fault Analysis", *Proc. IEEE*, 116, (5), pp. 857-865, 1969.
- [8] T. H. Chen, M. Chen, W. Lee, P. Kotas and P. V. Olinda, "Distribution System Short-Circuit Analysis – A Rigid Approach", *Trans. On PWRS*, vol. 7, pp. 444-450, February 1992.
- [9] W. H. Kersting and W. H. Phillips, "Distribution System Short Circuit Analysis," presented at the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf., Reno, NV, Aug. 12-17, 1990.
- [10] X. Zhang, F. Soudi, D. Shirmohammadi, C. Cheng, "A Distribution Short Circuit Analysis Approach Using Hybrid Compensation Method", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, pp. 2053-2059, Nov. 1995.



- [11] M. Todorovski, D. Rajicic, "Handling Three-Winding Transformers and Loads in Short Circuit Analysis by the Admittance Summation Method", IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, Aug. 2003.
- [12] U. Bordalo, A. B. Rodrigues, M. G. Da Silva, "Modeling of Faults on Overhead Lines in Distribution Systems Using the Admittance Summation Method", Powercon 2004.
- [13] R. C. Dugan, M. McGranaghan, "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, McGraw-Hill Companies, New York, 2002.

## X. BIOGRAFIAS

**Maria da Guia da Silva** é professora associado do DEE-UFMA. É mestre pela UFPB e Ph.D pela UMIST-UK. Seu interesse principal de pesquisa é modelagem, cálculo e aplicação de métodos probabilísticos em problemas de sistemas elétricos, particularmente aqueles ligados com confiabilidade e qualidade de energia. Ela é membro do IEEE e CIGRÉ.

**Anselmo Barbosa Rodrigues** é aluno de doutorado da PUC-Rio. Ele é graduado e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Seu interesse principal de pesquisa é confiabilidade de sistemas elétricos.

**Agnelo Coelho** é aluno de doutorado da PUC-Rio. Ele é graduado e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Seu interesse principal de pesquisa é confiabilidade de sistemas elétricos.

**Tomas Almeida** é aluno de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

**Felipe Franco** é aluno de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

**Tiago Alencar** é aluno de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

**Ulisses Bordalo** é engenheiro da Companhia Energética do Estado do Maranhão (CEMAR). Concluiu o curso de engenharia elétrica na Universidade Federal do Maranhão (UFMA).