

ESTIMAÇÃO PROBABILÍSTICA DO NÍVEL DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIAS

ELSON N. M. SILVA, ANSELMO B. RODRIGUES, MARIA G. SILVA

Laboratório de Confiabilidade e Qualidade, Departamento de Engenharia Elétrica, UFMA
Cidade Universitária Dom Delgado, Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga, CEP: 65080-805, São Luís-MA
E-mails: elson-ms@hotmail.com, anselmo@dee.ufma.br, guia@dee.ufma.br

Abstract—Currently, there is a growing tendency of increasing in the number of nonlinear loads connected to distribution networks due to the technological advances related to these loads. This issue has concerned the electric utilities because they must ensure that any effect of harmonics on equipment and system operation does not compromise the quality of the electric power supply. This paper has as objective to propose a methodology to estimate the voltage harmonic distortion level in the secondary distribution networks considering uncertainties associated with the random behavior of the nonlinear loads. The methodology is based on the combination of two techniques: three-phase harmonic load flow via current summation method, to evaluate the nodal voltages, and the point estimate method, to model uncertainties in the nonlinear loads. The results in a European distribution network with 906 nodes demonstrate that the method is very accurate to estimate the voltage total harmonic distortion. Furthermore, the proposed technique is able to identify the most vulnerable areas to harmonic problems in the secondary distribution network.

Keywords—Distribution systems, Voltage Harmonic Distortion, Probabilistic Methods, Harmonic load flow, Point Estimate Method

Resumo—Atualmente, há uma tendência crescente de aumento no número de cargas não lineares conectadas a rede de distribuição devido aos avanços tecnológicos relacionados com estas cargas. Isso tem preocupado as concessionárias de energia elétrica, pois elas devem garantir que os eventuais efeitos das harmônicas nos equipamentos e na operação do sistema não comprometam a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Este artigo tem como objetivo propor uma metodologia para estimar o nível de distorção harmônica total de tensão na rede de distribuição secundárias considerando incertezas associadas com o comportamento aleatório das cargas não lineares. A metodologia se baseia na combinação das seguintes técnicas: fluxo de potência harmônico trifásico via soma de correntes, para calcular as tensões nodais, e o método de estimação por pontos, para modelar incertezas nas cargas não lineares. Os resultados em uma rede de distribuição europeia de 906 nós mostram que o método é bastante preciso para estimar a distorção harmônica total de tensão. Além disso, a técnica proposta é capaz de identificar as áreas mais suscetíveis a problemas de harmônicos na rede de distribuição secundária.

Palavras-chave—Sistemas de distribuição, Distorção harmônica de tensão, Métodos Probabilísticos, Fluxo de carga harmônico, Método de Estimação por Pontos.

1 Introdução

Um dos distúrbios de qualidade de energia elétrica (QEE) que mais afeta os consumidores da rede de distribuição é a distorção harmônica, que tem como característica principal deformar, distorcer ou remover a conformidade senoidal da tensão e/ou corrente. Este distúrbio é o resultado de uma superposição de uma série de ondas senoidais que possuem uma componente fundamental e outras múltiplas da fundamental, que são conhecidas como harmônicas.

A principal causa das distorções harmônicas são as chamadas fontes harmônicas, que são dispositivos que possuem características não lineares, tais como: equipamentos de informática, pontes retificadoras, variadores de velocidade, fornos a arco, iluminação fluorescente com reator eletr nico, etc.. Além disso, a tecnologia de Geração Distribuída (GD), que está cada vez mais presente nos sistemas de distribuição, pode ser uma potencial fonte de harmônica. Este efeito ocorre principalmente com as GD renováveis, como a fotovoltaica, que têm como um dos principais componentes o inversor (fonte de harmônicas) que conecta a GD a rede elétrica.

Portanto, a fim de garantir que os consumidores da rede de distribuição sejam atendidos com QEE adequada, existem normas técnicas, que limitam o nível de distorção harmônica permissível na rede (ANEEL, 2009). Desta forma, as concessionárias de energia elétrica devem avaliar o nível de distorção harmônica nos nós das redes de distribuição, a fim de mantê-los dentro dos limites permissíveis. Neste contexto, surgem as técnicas de análise de harmônicas para identificar áreas vulneráveis e selecionar as estratégias de mitigação de harmônicos mais eficientes.

Existem diversas técnicas para realizar análise de harmônicas no sistema elétrico, elas podem ser classificadas em dois grupos: técnicas no domínio do tempo e no domínio da frequência (Herraiz, 2003).

A análise no domínio do tempo é baseada na solução de um conjunto de equações diferenciais que representa o comportamento dinâmico dos componentes do sistema. Esta técnica   utilizada em programas de transit rios eletromagnéticos. A principal desvantagem da análise no domínio do tempo é o grande esforço computacional para resolver o sistema de equações diferenciais.

Os métodos no domínio da frequência são uma reformulação do problema de fluxo de potência convencional que inclui componentes não lineares.

Devido a isso, os métodos no domínio da frequência são também conhecidos como fluxos de potência harmônico (FPH). O FPH é o método mais usado na análise de harmônicos.

Na literatura técnica há diversos tipos de trabalhos relacionados com o FPH. Das (2015) formula os métodos de FPH via Newton Raphson e Injeção de Corrente. Teng (2007) e Tostes (2003) implementam um FPH trifásico usando o método de varredura progressiva/regressiva via soma de corrente para estimar as tensões harmônicas da rede de distribuição. Variz (2006) desenvolve um FPH trifásico baseado nas equações de injeção de corrente de forma iterativa usando o método de Newton Raphson.

Entretanto, os métodos de FPH não têm a capacidade de considerar incertezas associadas com o comportamento aleatório da rede elétrica, tais como erros de previsão de carga, flutuações de carga, falhas de geradores, contingências nos circuitos, etc. Essas incertezas também afetam a distorção harmônica. Além disso, Au (2006) e Ribeiro (2009) mostraram que as correntes harmônicas nas barras da rede e do consumidor são variantes no tempo e aleatórias.

Portanto, a fim de obter resultados mais precisos, deve-se utilizar técnicas probabilísticas para representar as incertezas na avaliação da distorção harmônica. Estas exigências resultaram no surgimento do fluxo de potência harmônico probabilístico (FPHP).

O FPHP é uma ferramenta matemática que avalia as tensões e correntes harmônicas considerando as incertezas presentes no sistema. Ele consiste em obter as funções densidade de probabilidade (PDF) das variáveis de saída, que são as magnitudes e as fases das tensões harmônicas, a partir das PDF das variáveis de entrada. Basicamente, o FPHP é uma combinação das equações FPH com uma técnica probabilística para modelar as incertezas. Na literatura há diversas técnicas probabilísticas aplicadas para solucionar o problema de FPHP. Caramia et al. (2003) considera incertezas nas cargas lineares e não lineares na comparação das seguintes técnicas probabilísticas de estimação das PDF de tensões harmônicas: convolução, Simulação Monte Carlo (SMC) linear e não-linear e distribuição de Pearson. A referência (Au e Milanovic, 2006) realiza uma avaliação probabilística do nível de distorção harmônica em uma rede de distribuição de média tensão usando a técnica de Simulação Monte Carlo para representar as incertezas das correntes harmônicas. Abdelrahman et al. (2014) usaram a Simulação Monte Carlo para representar as incertezas presentes nas fontes harmônicas da rede de distribuição com GD. Mohammadi (2015) propôs uma solução para o FPHP usando o Método de Estimação por Pontos.

Desta forma, este artigo tem como objetivo propor uma nova metodologia probabilística para avaliar o nível de distorção harmônica total de tensão (DTT) na rede de baixa de tensão. A metodologia se

baseia na combinação das seguintes técnicas: fluxo de potência harmônico trifásico via soma de correntes, para calcular as tensões nodais, e o método de estimação por pontos (MEP), para modelar incertezas nas cargas não lineares. Os resultados em uma rede de distribuição europeia de 906 nós (DSASC, n.d.) mostram que o método é bastante preciso para estimar a DTT. Além disso, a técnica proposta é capaz de identificar as áreas mais susceptíveis a problemas de harmônicos na rede de distribuição secundária. A contribuição desta metodologia em relação às encontradas na literatura é a modelagem da rede em coordenadas de fase com a inclusão do neutro e do aterramento.

2 Modelos Determinísticos

2.1 Modelagem das Fontes de Harmônicas

As fontes de harmônicas são modeladas como fontes constantes de correntes harmônicas desacopladas. Deste modo, a injeção de corrente harmônica em um nó pode ser determinada a partir da sua tensão na frequência fundamental e de seus vetores de parâmetros de acordo com (1) (Herraiz, 2003).

$$\dot{I}_i^{abcn,h} = d_i^{abcn,h} (V_i^{abcn,1}, \alpha_i, \beta_i) \quad (1)$$

Onde: $\dot{I}_i^{abcn,h}$ é o vetor 4×1 de injeções de corrente complexas nas fases (a, b e c) e no neutro (n) do nó i para a h-ésima harmônica; $V_i^{abcn,1}$ é o vetor 4×1 de magnitudes das tensões nas fases a, b, c e no neutro do nó i para a h-ésima harmônica; α_i e β_i são os parâmetros associados com a operação da fonte de harmônica conectada no nó i; $d_i^{abcn,h}$ é um vetor 4×1 de funções que mapeia $V_i^{abcn,1}$, α_i e β_i para $\dot{I}_i^{abcn,h}$.

Com base no desacoplamento, é também possível obter a injeção de harmônica através do espectro harmônico de medidas da forma de onda da corrente não senoidal.

2.2 Modelagem das Linhas Trifásicas

As seções dos alimentadores da rede de distribuição foram modeladas utilizando o modelo de coordenadas de fase de acordo com (2) (Kersting, 2007).

$$\dot{Z}^{abcn,h} = \begin{bmatrix} \dot{Z}^{aa,h} & \dot{Z}^{ab,h} & \dot{Z}^{ac,h} & \dot{Z}^{an,h} \\ \dot{Z}^{ba,h} & \dot{Z}^{bb,h} & \dot{Z}^{bc,h} & \dot{Z}^{bn,h} \\ \dot{Z}^{ca,h} & \dot{Z}^{cb,h} & \dot{Z}^{cc,h} & \dot{Z}^{cn,h} \\ \dot{Z}^{na,h} & \dot{Z}^{nb,h} & \dot{Z}^{nc,h} & \dot{Z}^{nn,h} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{Z}^{abcn,h}$ é matriz 4×4 de impedâncias mútuas entre os condutores das fases e do neutro para a h-ésima harmônica;

$$\dot{Z}^{\phi\phi,h} = r^{\phi} + K^{rser} f + jK_1^{xser} f \left(\ln \frac{1}{GMR^{\phi}} + K_2^{xser} + 0,5 \frac{\rho}{f} \right) \quad (3)$$

para $\phi \in \{a, b, c, n\}$

$$\dot{Z}^{\phi\varphi,h} = K^{rser} f + jK_1^{xser} f \left(\ln \frac{1}{D^{\phi\varphi}} + K_2^{xser} + 0,5 \frac{\rho}{f} \right) \quad (4)$$

para $\phi \in \{a, b, c, n\}$, $\varphi \in \{a, b, c, n\}$ e $\phi \neq \varphi$

$$K^{rser} = 0,0015; K_1^{xser} = 0,00202237; K_2^{xser} = 7,6786;$$

$\dot{Z}^{\phi\varphi,h}$ é a impedância mútua entre os condutores das fases ϕ e φ para a h -ésima harmônica; GMR^{ϕ} é o raio médio geométrico do condutor ϕ ; $D^{\phi\varphi}$ é a distância entre os condutores ϕ e φ , $f = f_{fund} \times h$ é a frequência do sistema, f_{fund} é a frequência fundamental, h é a ordem harmônica e ρ é a resistividade do solo.

2.3 Fluxo de Carga Harmônico Trifásico via Soma de Corrente

O FPH trifásico via soma de correntes, foi o utilizado para obter o estado harmônico da rede elétrica. Esta técnica é semelhante ao método de soma de correntes convencional proposto em (Shirmohammadi, 1995) que utiliza a técnica de varredura progressiva/regressiva para acumular correntes nos ramos através da Lei de Kirchhoff das Correntes e calcular as tensões nodais via Lei de Kirchhoff das Tensões. Uma grande vantagem deste método é que em sistemas em que todas as cargas são fontes de harmônicos, a estimação do estado harmônico não é iterativa, ou seja, o estado harmônico é determinado realizando apenas uma varredura progressiva/regressiva. Esta característica é devido ao fato de que as fontes de harmônicos são modeladas como fontes de correntes constantes. Considerando-se o modelo proposto por Ciric (2003) para redes multiterradas, têm-se os seguintes passos para um FPH:

i) Calcular as correntes harmônicas nos ramos através de uma varredura regressiva:

$$\dot{B}_{ij}^{abcn,h} = \alpha \sum_{k \in J_j} \dot{B}_{jk}^{abcn,h} + \dot{I}_j^{abcn,h} \quad (5)$$

para $ij \in L_l$ e $l = N^{cam}, N^{cam}-1, \dots, 1$

Onde: o subscrito ij denota o ramo do nó i para o nó j ; $\dot{B}_{ij}^{abcn,h}$ é o vetor 4×1 das correntes complexas nas fases e no neutro no ramo ij para a harmônica h ; J_j é conjunto de ramos imediatamente a jusante do nó j ; L_l é o conjunto de ramos pertencente a camada l ; N^{cam} é o número de camadas; a camada de um ramo é número de ramos entre o seu nó final e nó fonte, incluindo-se o próprio ramo; $\alpha = \dot{Z}_j^{ater,h} / (\dot{Z}_j^{ater,h} + \dot{Z}_{ij}^{nn,h})$, se o nó final do ramo ij

estiver aterrado, caso contrário, $\alpha = 1$; $\dot{Z}_j^{ater,h}$ é a impedância de aterramento do nó j .

ii) Calcular as tensões harmônicas, através de uma varredura progressiva:

$$\dot{E}_j^{abcn,h} = \dot{E}_i^{abcn,h} - \dot{B}_{ij}^{abcn,h} \dot{Z}_{ij}^{abcn,h} \quad (6)$$

para $ij \in L_l$ e $l = 1, 2, \dots, N^{cam}$

Onde: $\dot{Z}_{ij}^{abcn,h}$ é a matriz de impedâncias mútuas do ramo ij para a harmônica, definida de acordo com (2); $\dot{E}_j^{abcn,h}$ é o vetor 4×1 das tensões nodais complexas nas fases e no neutro no nó j para a harmônica h ;

3 Método de Estimação por Pontos

O método de estimação por pontos com três pontos foi à técnica probabilística usado neste artigo para modelar incertezas associadas com as cargas não-lineares. Inicialmente, esta técnica foi proposta por Rosenbluth (1975) para calcular os momentos estatísticos de uma variável aleatória que é função de uma ou várias variáveis aleatórias através de modelos determinísticos.

Conforme Kaffashan (2015), considera-se que $X = (x_1, x_2, \dots, x_l, \dots, x_m)$ é um vetor de m variáveis aleatórias com suas respectivas PDF f_{x_l} e que $Y(X) = Y(x_1, x_2, \dots, x_l, \dots, x_m)$ é uma função não linear de X . O método MEP consiste em usar três variantes de x_l , que são $x_{l,1}$, $x_{l,2}$ e $x_{l,3}$, definidas em (7) para substituir f_{x_l} .

$$x_{l,k} = \mu_{x_l} + \xi_{l,k} \sigma_{x_l} \quad (7)$$

Em que: μ_{x_l} e σ_{x_l} são a média e o desvio padrão, respectivamente, de f_{x_l} ;

$$\xi_{l,k} = \begin{cases} 0,5\lambda_{l,3} + (-1)^{3-k} \sqrt{\lambda_{l,4} - 0,75(\lambda_{l,3})^2}, & k=1,2 \\ 0, & k=3 \end{cases} \quad (8)$$

$\lambda_{l,j} = M_j(x_l) / (\sigma_{x_l})^j$, sendo que M_j é o j -ésimo momento central de x_l .

Após determinadas $x_{l,1}$, $x_{l,2}$ e $x_{l,3}$ são calculadas $Y_{l,1} = Y(x_1, \dots, x_{l,1}, \dots, x_m)$, $Y_{l,2} = Y(x_1, \dots, x_{l,2}, \dots, x_m)$ e $Y_{l,3} = Y(x_1, \dots, x_{l,3}, \dots, x_m)$.

Então o j -ésimo momento de Y_l é obtido usando a seguinte expressão:

$$E(Y_l^j) = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^3 w_{l,k} \times (Y_{l,k})^j \quad (9)$$

Onde $w_{l,k}$, definido em (10), é o peso dos pontos $x_{l,1}$, $x_{l,2}$ e $x_{l,3}$.

$$w_{l,k} = \begin{cases} (-1)^{3-k} / [\xi_{l,k} (\xi_{l,1} - \xi_{l,2})], & k=1,2 \\ \frac{1}{m} - \frac{1}{\lambda_{l,4} - \lambda_{l,3}^2}, & k=3 \end{cases} \quad (10)$$

4 Algoritmo da Estimação Probabilística da Distorção Harmônica Total de Tensão via MEP

O algoritmo para avaliação probabilística da DTT baseado no MEP é resumido nos seguintes passos:

- i) Ler dados da rede de distribuição.
- ii) Ler dados probabilísticos das injeções de correntes harmônicas (média e o desvio padrão).
- iii) Repetir os passos (iv)-(ix) para cada ordem harmônica h .
- iv) Ajustar a injeção de corrente harmônica de todas as cargas no valor médio.
- v) Repetir os passos (vi)-(viii) para $l=1, \dots, N^{fn}$, em que N^{fn} é o número de fontes de harmônicas.
- vi) Para a fonte de harmônica l , calcular os pontos $x_{l,1}$, $x_{l,2}$ e $x_{l,3}$ da injeção harmônica, usando (7), e os pesos $w_{l,1}$, $w_{l,2}$ e $w_{l,3}$ usando (10).
- vii) Utilizando o fluxo de carga harmônico determinístico, calcular os seguintes estados harmônicos: $V_{i,p}^{\phi,h}$ para $i=1,2,\dots,N^{nos}$, $\phi \in \{a,b,c,n\}$ e $p=1,2,3$, onde $V_{i,p}^{\phi,h}$ é magnitude da tensão na fase ϕ (incluindo o neutro), do nó i , para a h -ésima harmônica e com relação a variante $x_{l,p}$ da fonte harmônica l e N^{nos} é o número de nós da rede elétrica.
- viii) A partir de (9) adicionar a contribuição da fonte harmônica l ao j -ésimo momento do estado harmônico de acordo com (11).

$$E\{[V_i^{\phi,h}]^j\} = E\{[V_i^{\phi,h}]^j\} + \sum_{p=1}^3 w_{l,p} [V_{i,p}^{\phi,h}]^j \quad (11)$$

Onde $V_i^{\phi,h}$ é magnitude da tensão na fase ϕ (incluindo o neutro) do nó i para a harmônica h .

- ix) Calcular a média e o desvio padrão de $V_i^{\phi,h}$ partir de (12) e (13), respectivamente.

$$\mu\{V_i^{\phi,h}\} = E\{V_i^{\phi,h}\} \quad (12)$$

$$\sigma\{V_i^{\phi,h}\} = \sqrt{E\{[V_i^{\phi,h}]^2\} - E^2\{V_i^{\phi,h}\}} \quad (13)$$

para $i=1,2,\dots,N^{nos}$, $\phi \in \{a,b,c,n\}$

Após obter os momentos e os dados da média e do desvio padrão do módulo do estado harmônico para todas as frequências harmônicas, o MEP é aplicado novamente para obter, agora, os dados estatísticos da DTT. O algoritmo continua conforme:

- x) Repetir os passos (xi)-(xv) para $l=1, \dots, N^{nos}$.
- xi) Ajustar todas as tensões harmônicas de todas os nós e de todas as frequências em seus valores médios.
- xii) Repetir os passos (xiii)-(xv) para cada ordem harmônica h ;
- xiii) Calcule os pontos $x_{l,1}$, $x_{l,2}$ e $x_{l,3}$, usando (7), e os pesos $w_{l,1}$, $w_{l,2}$ e $w_{l,3}$, usando (10), para $V_{i,p}^{\phi,h}$ com $\phi \in \{a,b,c,n\}$.
- xiv) Calcule os valores de DTT para os pontos $x_{l,1}$, $x_{l,2}$ e $x_{l,3}$ das tensões harmônicas, obtidos no passo (xiii), de acordo com (14).

$$DTT_{l,p}^{\phi} = \left(\sqrt{[V_{l,p}^{\phi,h}]^2 + \sum_{g \in H^*} \mu\{[V_l^{\phi,h}]^2\}} \right) / V_l^{\phi,1} \quad (14)$$

para $p=1,2,3$ e $\phi \in \{a,b,c,n\}$

Onde $DTT_{l,p}^{\phi}$ é a DTT da fase ϕ do nó l para a variante p ; $V_l^{\phi,1}$ é a magnitude da tensão na fase ϕ do nó l para a frequência fundamental ($h=1$) e H^* é o conjunto de todas as harmônicas, exceto a harmônica h .

- xv) A partir de (9) adicionar a contribuição da harmônica l ao j -ésimo momento da DTT da fase ϕ do nó l (DTT_l^{ϕ}) de acordo com (15).

$$E\{[DTT_l^{\phi}]^j\} = E\{[DTT_l^{\phi}]^j\} + \sum_{p=1}^3 w_{l,p} [DTT_{l,p}^{\phi}]^j \quad (15)$$

para $\phi \in \{a,b,c,n\}$

Onde $E\{[DTT_l^{\phi}]^j\}$ é o j -ésimo momento de DTT_l^{ϕ} .

- xvi) Calcule a média e o desvio padrão de DTT_l^{ϕ} segundo (16) e (17).

$$\mu\{DTT_l^{\phi}\} = E\{DTT_l^{\phi}\} \quad (16)$$

$$\sigma\{V_l^{\phi,h}\} = \sqrt{E\{[DTT_l^{\phi}]^2\} - E^2\{DTT_l^{\phi}\}} \quad (17)$$

para $l=1,2,\dots,N^{nos}$, $\phi \in \{a,b,c,n\}$

- xvii) Gerar as PDF das DTT de todas as barras.

5 Resultados

5.1 Características do Sistema Teste

A metodologia proposta foi testada em uma rede de distribuição secundária europeia com 906 nós (RDSE-906) (DSASC, n.d.). Este sistema é denominado de RDSE-906 a partir daqui. Os testes foram realizados na condição de pico de carga. No RDSE-906 as cargas totais nas fases A, B e C são 21,404 kW, 26,937 kW e 6,319 kW, respectivamente. Os seguintes dados complementares foram considerados no estudo (CIGRE, 2013): resistividade do solo (ρ) de 100Ω-m e aterramento típico de 40Ω para os pontos de cargas e de 3Ω para a subestação.

É importante enfatizar que, neste alimentador são dadas apenas as impedâncias de sequências positiva, negativa e zero. Visando modelar o sistema a quatro fios, foram determinados os valores dos RMG do alimentador RDSE-906 considerando a configuração subterrânea típica de sistemas europeus de baixa tensão apresentada em (CIGRE, 2013). Os RMG foram calculados usando os valores de sequência positiva, com o RMG da fase considerado igual ao do neutro. Na Tabela 1 são mostrados os valores dos RMG calculados.

Tabela 1. RMG calculados do alimentador ETBT-906

Código do Cabo	RMG (cm)	Código do Cabo	RMG (cm)
2c_.007	0,1858	4c_.1	0,2810
2c_.0225	0,2321	4c_.35	0,3067
2c_.16	0,2213	4c_.185	0,3043
35_SAC_XSC	0,2077	4c_.70	0,2901
4c_.06	0,2722	4c_95_SAC_XC	0,2765

5.2 Características das Fontes de Harmônicas

Todas as cargas do alimentador RDSE-906 foram consideradas como fontes de harmônicas injetando correntes de 3ª e 5ª ordem. Os valores médios das injeções harmônicas foram obtidos a partir da Tabela A.I de (Collin, 2010). Foi considerado um desvio padrão de 10% em relação aos valores médios das injeções harmônicas para cada carga.

5.3 Resultados das Simulações

Nas Figuras 1 e 2 têm-se os valores médios das DTT nodais das fases B e C estimados com a metodologia proposta, plotados no GIS (*Geographic Information System*) do alimentador RDSE-906. Pode-se observar que a fase B apresenta os maiores níveis médios de DTT, em torno de 2,5%. A fase C apresenta os menores valores médios de DTT. Esse comportamento é devido ao carregamento de cada fase. A fase B tem maior carregamento, por isso ela tem uma maior injeção de harmônicos. A fase C tem menor carregamento e, consequentemente, tem menor injeção de harmônicos. O nível de DTT da fase A é aproximadamente igual ao da fase B.

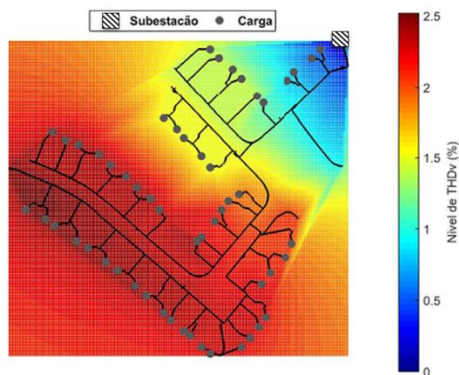


Figura 1. Valor médio do DTT da Fase B.

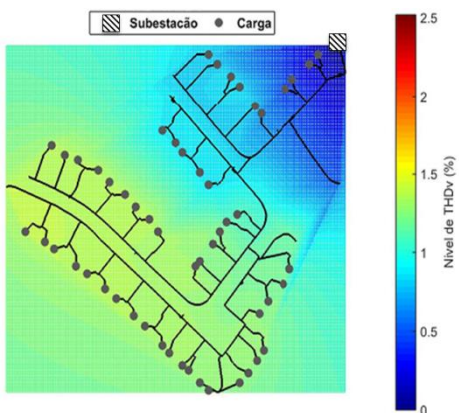


Figura 2. Valor médio do DTT médio da Fase C.

Nas Figuras 3 e 4 são mostrados os valores dos desvios padrão das DTT nodais das fases B e C, respectivamente. Estes valores representam a variação das DTT estimadas com a metodologia. A fase B foi a que apresentou a maior variação de DTT. A fase C é aquela com menor variação de DTT nodal. A variação da fase A foi praticamente idêntica a da fase B.

A partir dos gráficos das Figuras de 1 até 4, pode-se notar que as barras próximas da subestação possuem menores valores médios e variação da DTT, enquanto que nas barras mais distantes da subestação ocorre o contrário.

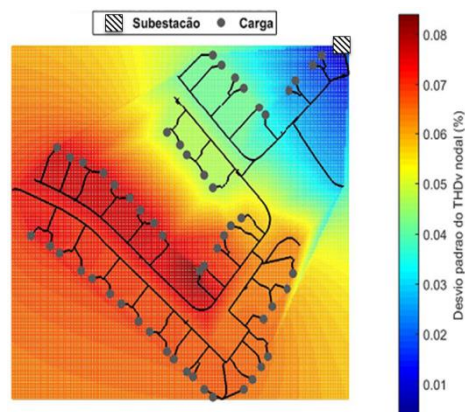


Figura 3. Desvio padrão do DTT da fase B.

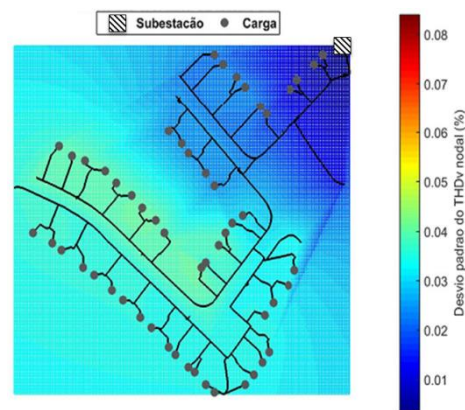


Figura 4. Desvio padrão do DTT da fase C.

A validação da metodologia foi realizada usando a Simulação Monte Carlo (SMC) para calcular as médias e os desvios padrões das DTT nodais. O tamanho da amostra usada na SMC foi de 30.000. A máxima incerteza relativa (coeficiente de variação) associada com os índices estimados via SMC foi de 0,0528%. Estas estatísticas foram comparadas com aquelas obtidas via MEP através dos erros relativos com relação à SMC.

Na Tabela 2 são mostradas as estatísticas referentes aos erros relativos da média e do desvio padrão das DTT nodais. Estas estatísticas foram calculadas considerando que as amostras são os conjuntos de erros relativos das médias e desvios padrões das DTT para os nós do sistema. A partir da Tabela 2, pode-se observar que os erros calculados da média são insignificantes. Por outro lado, os erros dos desvios padrões não chegam a 3%. Desta forma, pode-se concluir que os resultados fornecidos pelo MEP são precisos com relação àqueles gerados pela SMC.

As CDFs (*Cumulative Distribution Function*) obtidas com a metodologia proposta são comparadas com as da SMC, a fim de reforçar a validação do método proposto. Como o sistema possui muitas barras, foram plotadas as CDFs de cada fase e do neutro apenas para as barras que apresentaram o

maior valor da soma dos quadrados dos erros relativos da média e do desvio padrão. A Figura 5 apresenta as CDFs da fase A na barra 906, da fase B na barra 197, da fase C na barra 83 e do neutro na barra 34. A partir desta figura pode-se concluir que a CDF gerada pelo MEP tem boa aderência   CDF obtida via SMC.

Tabela 2. Erros estatísticos da média (ϵ_μ) e desvio padrão (ϵ_σ) (%)

		Fase A	Fase B	Fase C	Neutro
Max	ϵ_μ	0,1168	0,0743	0,0174	0,0113
	ϵ_σ	1,3157	1,5196	2,9157	2,0492
Min	ϵ_μ	0,0165	0,0071	0	0
	ϵ_σ	0,1949	0,0374	0,1652	1,1768
Média	ϵ_μ	0,0282	0,0140	0,0039	0,0053
	ϵ_σ	1,1508	1,2674	2,1502	1,6395
Q _{inf}	ϵ_μ	0,0223	0,0117	0,0024	0,0031
	ϵ_σ	1,0451	1,1822	1,9109	1,5465
Mediana	ϵ_μ	0,0279	0,0127	0,0040	0,0057
	ϵ_σ	1,1748	1,3151	2,2429	1,6856
Q _{sup}	ϵ_μ	0,0308	0,0156	0,0053	0,0075
	ϵ_σ	1,2400	1,3569	2,3170	1,7195

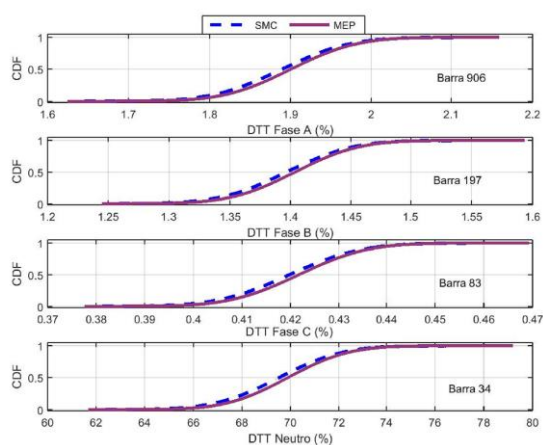


Figura 5. Comparação das CDF da Simulação Monte Carlo e da metodologia proposta via MEP.

6 Conclusões

Neste artigo foi apresentada uma metodologia probabilística para estimar a distorção harmônica total em redes de distribuição de baixa tensão. A metodologia é uma combinação do fluxo de potência harmônico via soma de correntes e do método de estimação por pontos. Os resultados dos testes com a RDSE-906 demonstraram que:

- A análise de harmônicos com a DTT estimada probabil sticamente é mais completa, pois mostra a variação da DTT devido às incertezas associadas com as fontes de harmônicas.
- Na RDSE-906 os níveis de DTT não violam o limite de 10% especificado no PRODIST (ANEEL, 2010).
- A metodologia proposta tem boa precisão, pois os erros com relação à SMC foram pequenos.

Referências Bibliográficas

Abdelrahman, S., Liao, H., Yu J. e Milanovic, V. J. (2014) "Probabilistic Assessment of the Impact of Distributed

- Generation and Non-linear Load on Harmonic Propagation in Power Networks". *Power Systems Computation Conference*, Wroclaw, Pol nia.
- ANEEL - Ag ncia Nacional de Energia El trica, (2009), "Procedimentos de Distribuição de Energia El trica no Sistema El trico Nacional - PRODIST, M dulo 8 - Qualidade da Energia El trica", Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>, Acesso em: 17 de mar o 2016.
- Au, M. T. e Milanovic, J. V. (2006). "Stochastic Assessment of Harmonic Distortion Level of Medium Voltage Radial Distribution Network". *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH*, Estocolmo, Su cia.
- Caramia, P., Carpinelli, G., Esposito, T. e Varilone, P. (2003) Evaluation Methods and Accuracy in Probabilistic Harmonic Power Flow. *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 13, No. 6, pp. 391-398.
- CIGRE (2013), Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources. Technical Brochure 575, Cigr .
- Ciric, R. M., Feltrin, A. P. e Ochoa, L. F. (2003) Power Flow in Four-Wire Distribution Networks—General Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 4; pp. 1283-1290.
- Collin, A. J., Acosta, J. L., Hayes, B. P. e Djokic, S. Z. (2010) "Component-based Aggregate Load Models for Combined Power Flow and Harmonic Analysis". *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Agia Napa, Chipre.
- Das, J. C. (2015) Power System Harmonics and Passive Filter Design. IEEE Press.
- Herraiz, S., Sainz, L. and Clua, J. (2003). Review of Harmonic Load Flow Formulations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3; pp. 1079-1087.
- Kaffashan, I. e Amraee, T. (2015) Probabilistic Undervoltage Load Shedding Using Point Estimate Method. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 9, Iss. 15; pp. 2234-2244.
- Kersting, W. H. (2007). *Distribution System Modeling and Analysis*, 2[ ] ed., CRC Press.
- Mohammadi, M. (2015). "Probabilistic harmonic load flow using fast point estimate method". *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, Iss. 13, pp. 1790-1799.
- DSASC (Distribution Systems Analysis Subcommittee) (n.d.) Radial Test Feeders [Internet], IEEE PES. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>> [Acessado 05 de Mar o de 2016].
- Ribeiro, P. F. (2009) Time-Varying Waveform Distortions in Power Systems, 1[ ] edi  o - John Wiley & Sons, Ltd.
- Rosenblueth, E. (1975), "Point estimation for probability moments". *Proc. Nat. Acad. Sci.*, vol. 72, no. 10, pp. 3812-3814.
- Shirmohammadi, D e Cheng, C. S. (1995). A three-phase power flow method for real time distribution system analysis. *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 10, no. 2; pp. 671-769.
- Teng, J. H. e Chang, C. Y. (2007). Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Analysis Method for Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3; pp. 1665-1672.
- Tostes, M. E. L. (2003) "Avaliação Dos Impactos Causados pela Geração de Harm nicos na Rede De Distribuição em Consumidores em Baixa Tensão". Tese de doutorado, PPGE/CT/UFPA.
- Variz, A. M. (2006). "Calculo do Fluxo de Harmônicas em Sistemas Trifásicos Utilizando o Método de Injeção de Correntes". Tese de doutorado, COPPER/UFRJ.