



UMA PROPOSTA PARA O COMPARTILHAMENTO DAS RESPONSABILIDADES SOBRE AS DISTORÇÕES HARMÔNICAS USANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Fabiana Alves Pereira*¹, Sérgio Ferreira de Paula Silva¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo - Atualmente, maiores são as exigências dos consumidores e das agências reguladoras por sistemas de fornecimento contínuo e em conformidade com os parâmetros necessários para o correto funcionamento dos equipamentos conectados à rede de energia elétrica. Paradoxalmente, observa-se que é cada vez mais comum a presença de dispositivos com características não-lineares, que são responsáveis por gerar distorções harmônicas de corrente e tensão no sistema. Em casos nos quais as distorções harmônicas excedem os limites definidos por norma, procedimentos devem ser realizados para adequação do sistema, o que envolve custos financeiros. Neste contexto, surge o termo “compartilhamento de responsabilidades”. Este trabalho tem por objetivo usar evolução diferencial para através de dados de tensão e corrente, medidos no ponto de acoplamento comum, atribuir as responsabilidades das distorções harmônicas presentes no sistema.

Palavras-Chave - Compartilhamento de Responsabilidades, Evolução Diferencial, Distorções Harmônicas.

A PROPOSAL FOR THE SHARING OF RESPONSIBILITIES ON HARMONIC DISTORTIONS USING DIFFERENTIAL EVOLUTION

Abstract - Currently, the consumers and regulatory agencies are more demanding about the quality of power supply systems. Contradictorily, it is increasingly common the presence of devices with non-linear characteristics, that are responsible for generating harmonic distortions of current and voltage in the system. When the harmonic distortions produced by such devices exceed the specified limits, mitigation procedures must be promptly considered. However, the implementation of such corrective measures involves financial costs, which can cause conflict between the supplier and the consumer about who is mainly responsible for the harmonic distortions. In this context, emerge the term "sharing harmonic responsibility". Thus, the purpose of this work is apply differential evolution to assign the responsibilities

of the harmonic distortions present in the system through voltage and current data, measured at the common coupling point.

Keywords - Differential evolution, Harmonic distortion, Sharing harmonic responsibility.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], o termo qualidade é uma medida de quão bem a energia elétrica fornecida pode ser utilizada pelos consumidores, levando em consideração tanto aspectos relacionados com a continuidade do fornecimento, ou seja, ausência de interrupções, quanto níveis de conformidade de parâmetros, tais como: distorções, flutuações de tensão, variação de tensão de curta duração, desequilíbrios de sistemas trifásicos e transitórios rápidos.

É interessante observar, conforme evidência [2], que as discussões de tópicos relacionados a qualidade da energia elétrica (QEE) crescem de forma proporcional a inserção desta no dia-a-dia das pessoas. Dessa forma é indispensável, no cenário atual, a existência de sistemas capazes de fornecer energia de forma ininterrupta e dentro de padrões capazes de garantir o correto funcionamento dos diversos equipamentos acoplados a rede.

Posto isto, e considerando a mudança na natureza das cargas que formam o complexo consumidor, onde é cada vez mais comum a presença de equipamentos com características não-lineares [2], ganha destaque assuntos relacionados a existência de distorções harmônicas.

As distorções harmônicas de tensão são originadas por dispositivos não-lineares, ou seja, dispositivos que não apresentam uma relação linear entre a tensão e a corrente, tais como: eletrônicos, acionamentos de velocidade variável, retificadores, lâmpadas compactas, fornos e soldas a arco, reatores saturados, dentre outros [3].

Portanto, tendo em vista que a existência abundante das cargas não-lineares originam as distorções harmônicas de corrente e/ou de tensão e conseqüentemente a degradação da QEE comprometendo o funcionamento de outros dispositivos conectados à rede, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vêm, por meio do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), estipular os valores máximos para as distorções harmônicas de

*fabiana.pereira@ufu.br

forma a garantir o funcionamento e o desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica [4].

Sendo assim, caso se verifique que os níveis de distorções harmônicas no sistema são maiores que os estabelecidos na norma, deverá ser realizada a implementação de métodos para adequação dos valores mensurados. Neste contexto, surge o termo “compartilhamento de responsabilidades”, uma vez que existem custos associado a este processo de adequação que deverá ser realizado [3].

Neste sentido, diversas pesquisas têm sido conduzidas buscando identificar as parcelas de responsabilidades sobre as distorções harmônicas e o presente trabalho tem por objetivo utilizar um algoritmo de evolução diferencial para promover a separação das parcelas de contribuição do consumidor e da concessionária. Basicamente, pretende-se por meio do algoritmo determinar as impedâncias do consumidor e da concessionária utilizando somente valores de tensão e corrente, medidos no ponto de acoplamento comum (PAC).

II. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

O algoritmo de Evolução Diferencial (em inglês: *Differential Evolution* – DE), proposto por [5], consiste em um método estocástico, de fácil implementação, que apresenta um bom desempenho para uma grande classe de problemas [6], sendo por isso escolhido para o trabalho em questão.

Basicamente, neste algoritmo gera-se uma população aleatória de forma a cobrir todo o espaço de busca. Nota-se que em casos de ausência de qualquer informação prévia relacionada a este espaço, recomenda-se a utilização de uma distribuição uniforme para a população [7]. Uma vez criada a população inicial, realiza-se a operação de Mutação, a qual consiste basicamente na adição da diferença vetorial ponderada entre dois indivíduos a um terceiro, conforme Eq. (1).

$$V_{novo} = x_{r1,G} + F(x_{r3,G} - x_{r2,G}) \quad (1)$$

Onde:

- $x_{ri,G}$ - Indivíduo ri na geração G .
- F - constante real $\in [0,2]$, que determina a ponderação da diferença entre os indivíduos um e dois
- V_{novo} - Vetor mutado.

Após a mutação, segue-se a etapa de cruzamento (em inglês: *crossover*), na qual os vetores mutados são combinados com outros vetores pré-determinados, denominados vetores alvo (em inglês: *target vectors*), para gerar vetores de tentativa (em inglês: *trial vectors*). O principal objetivo desta etapa consiste na introdução de diversidade na população por meio da regra estabelecida na Eq. (2).

$$U_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & \text{se } r_j \leq CR \text{ ou } j = l_i \\ x_{ji,G}, & \text{se } r_j > CR \text{ ou } j \neq l_i \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

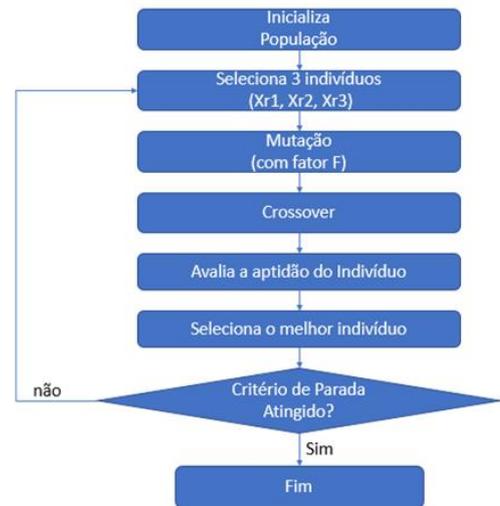
- r_j - Número gerado aleatoriamente.
- CR - Valor real determinado pelo usuário

- l_i - Índice aleatório utilizado para garantir que exista pelo menos uma diferença entre o *trial* vector e o target vector.

Finalmente, a última etapa do algoritmo de ED, consiste na seleção do indivíduo, *target* ou *trial vector*, que apresenta a melhor aptidão para compor a nova população.

Os passos descritos nesta seção são repetidos ciclicamente, até que a condição do critério de parada seja satisfeita, conforme ilustra o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma do algoritmo ED.

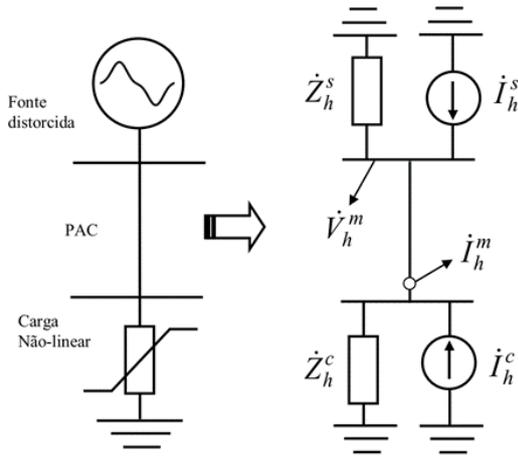


III. EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A metodologia utilizada neste trabalho para determinação da impedância equivalente do consumidor e da concessionária por meio de um algoritmo de ED baseia-se na utilização da decomposição da tensão e da corrente medidas no PAC por meio da Série de Fourier.

Para este caso, torna-se viável uma abordagem no domínio da frequência pois, conforme enfatiza [3], apesar dos sistemas elétricos apresentarem características fortemente dinâmicas, estes podem ser subdivididos em intervalos bem definidos de tempo para os quais as características de regime são praticamente inalteradas, tornando factível a utilização do princípio da superposição. Sendo assim, para o problema em questão o PAC pode ser modelado conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2: Modelagem do PAC.



Onde:

- \dot{I}_h^s - Corrente harmônica de ordem h, proveniente do sistema supridor.
- \dot{I}_h^c - Corrente harmônica da ordem h, resultante das cargas não lineares do consumidor.
- \dot{I}_h^m - Corrente harmônica de ordem h, medida no PAC.
- \dot{Z}_h^s Impedância harmônica equivalente do sistema supridor.
- \dot{Z}_h^c Impedância harmônica equivalente do consumidor.

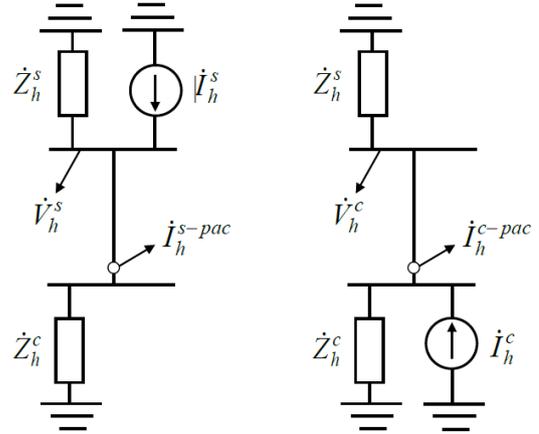
Por meio de uma análise do circuito apresentado na Figura 2, pode-se escrever os valores de corrente provenientes do supridor e do consumidor para cada uma das harmônicas consideradas no processo, conforme as Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente.

$$\dot{I}_h^s = \frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^s} + \dot{I}_h^m \quad (3)$$

$$\dot{I}_h^c = \frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^c} - \dot{I}_h^m \quad (4)$$

Aplicando o princípio da superposição para decomposição do circuito apresentado na Figura 2, obtém-se os circuitos apresentados na Figura 3.

Figura 3: Circuitos equivalentes aplicando o método de superposição.



Onde:

- \dot{I}_h^{s-PAC} - Contribuição do supridor para a corrente medida no PAC.
- \dot{I}_h^{c-PAC} - Contribuição do consumidor para a corrente medida no PAC.

Sendo assim, é possível por meio de uma análise do circuito apresentado na Figura 3 obter as relações matemáticas descritas nas Eq. 5 e Eq. 6.

$$\dot{I}_h^{s-PAC} = \frac{\dot{Z}_h^s}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \cdot \dot{I}_h^s \quad (5)$$

$$\dot{I}_h^{c-PAC} = \frac{\dot{Z}_h^c}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \cdot \dot{I}_h^c \quad (6)$$

Combinando as Eq. (5) e Eq. (6), tem-se o valor de corrente medida no PAC, que pode ser reescrita conforme a Eq. (7), ou Eq. (8). Sendo a Eq. (8) a função objetivo que deverá ser minimizada pelo algoritmo implementado.

$$\dot{I}_h^m - \dot{I}_h^{c-PAC} - \dot{I}_h^{s-PAC} = 0 \quad (7)$$

$$\dot{I}_h^m - \frac{\dot{Z}_h^c}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \cdot \left(\frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^c} - \dot{I}_h^m \right) - \frac{\dot{Z}_h^s}{\dot{Z}_h^s + \dot{Z}_h^c} \cdot \left(\frac{\dot{V}_h^m}{\dot{Z}_h^s} + \dot{I}_h^m \right) = 0 \quad (8)$$

Para verificar a eficiência do método, implementou-se o algoritmo no software comercial Matlab® e verificou-se o circuito ilustrado na Figura 4, cujos valores de tensão, corrente e impedâncias do sistema supridor e consumidor, são previamente conhecidos e se encontram disponibilizados na Tabela 1

Figura 4: Diagrama unifilar do sistema teste.

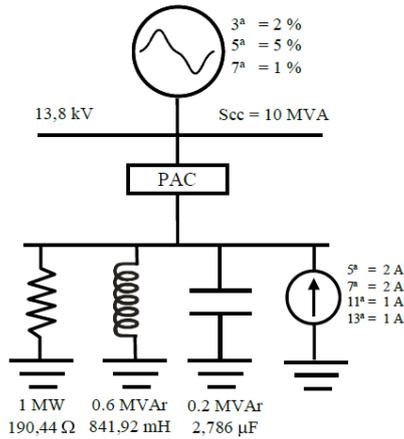


Tabela 1: Tamanhos e tipos de letras utilizadas no texto

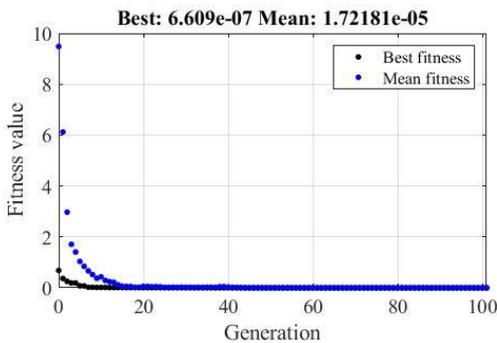
h	Tensão [V]	Corrente [A]	Zs(Ω)	Zc(Ω)
5ª	253,67∠ - 131,76°	2,66∠ - 41,65°	95,22∠90°	142,97∠ - 41,35°
7ª	378,42∠ - 173,48°	2,84∠ - 83,53°	133,31∠90°	115,32∠ - 52,73°
11ª	119,76∠128,96°	0,57∠ - 141,71°	209,48∠90°	80,45∠ - 65,01°
13ª	93,09∠119,27°	0,38∠ - 151,39°	247,57∠90°	69,44∠ - 68,02°

IV. RESULTADOS

Para verificar o desempenho do algoritmo para trabalhar com números complexos e realizar os ajustes necessários foram feitas simulações considerando a concessionária sem distorções harmônicas e com impedância conhecida. Ou seja, nesta etapa inicial, utilizou-se ED apenas para estimar a impedância e a fonte harmônica do sistema consumidor.

Notou-se que o algoritmo em questão apresentou melhor performance para constantes de ponderação com valores entre 1,5 e 2. Sendo que para a 5ª ordem harmônica, os resultados obtidos para a impedância elétrica do consumidor foi de $Z_c^{5ª} = 141,35 \pm 1,66 \angle - 45,04 \pm 9,84^\circ$, valor bem próximo ao esperado que é de $Z_c^{5ª} = 142,97 \angle - 41,35^\circ$.

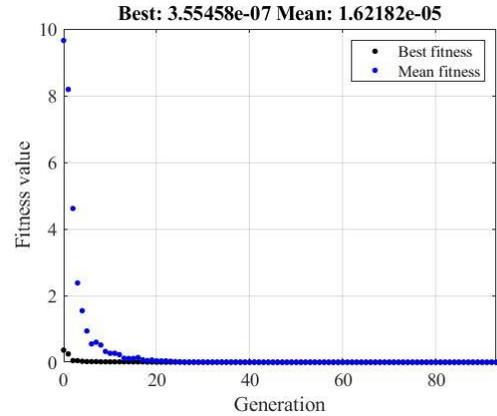
Figura 5: Resultado para 5ª ordem harmônica.



Para a 7ª ordem harmônica, os resultados obtidos também foram satisfatórios e o algoritmo provou ser bastante eficiente,

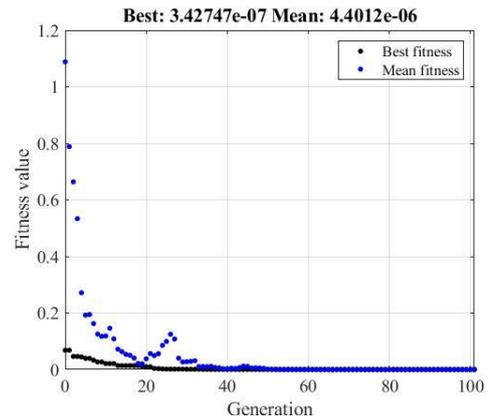
obtendo valores da ordem de $Z_c^{7ª} = 112,43 \pm 6,12 \angle - 50,67 \pm 4,59^\circ$, para a impedância elétrica da consumidor.

Figura 6: Resultado para 7ª ordem harmônica.



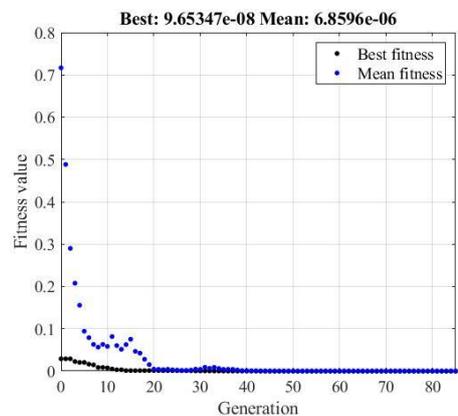
Já para a 11ª ordem harmônica, mantendo-se os mesmos parâmetros, o resultado obtido para a impedância elétrica do consumidor foi $Z_s^{11ª} = 80,29 \pm 9,23 \angle - 65,45 \pm 1,61^\circ$.

Figura 7: Resultado para 11ª ordem harmônica.



Finalmente para a 13ª obteve-se $Z_s^{13ª} = 78,6409 \pm 12,57 \angle - 70, \pm 1,41^\circ$.

Figura 8: Resultado para 13ª ordem harmônica.



V. CONCLUSÕES

Dado o cenário atual, em que aspectos relacionados com a qualidade da energia elétrica são de extrema relevância para garantir o fornecimento de energia ininterrupto e o correto funcionamento das cargas, o presente trabalho oferece um novo horizonte no que concerne ao compartilhamento das responsabilidades harmônicas.

Por meio da proposta realizada e do algoritmo implementado, foi possível constatar a viabilidade da utilização de métodos de evolução diferencial para obter dados relativo a impedância do consumidor, utilizando para isso dados de tensão e corrente medidos no PAC.

No entanto, embora os resultados logrados apresentem um indicativo positivo, o algoritmo, aqui proposto, ainda necessita passar por etapas de desenvolvimento, nas quais deverão ser inseridas funções de restrições que ajudem a modelar melhor o problema, de forma a garantir a obtenção de resultados satisfatórios, que contemplem uma maior variedade de operação.

AGRADECIMENTOS (OPCIONAL)

Os autores agradecem ao apoio financeiro prestado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS (EXEMPLOS)

- [1] S. M. Deckmann and J. A. Pomilio, "Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica," available in <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>, 2011. [Online]. Available: www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012. [Accessed: 10-Dec-2018].
- [2] E. L. Mehl, "Qualidade da energia elétrica," Univ. Fed. do Paraná, 2012.
- [3] S. F. de P. Silva, "Uma proposta para o compartilhamento das responsabilidades sobre as distorções harmônicas," Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- [4] A. N. de E. E. Aneel, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.," 2012.
- [5] R. Storn and K. Price, "Differential evolution-A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [R]," Berkeley ICSI, 1995.
- [6] R. L. de Araujo, "Evolução Diferencial para Problemas de Otimização com Restrições Lineares," Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.
- [7] L. Boccato, R. R. D. F. Attux, and F. J. Von Zuben, "Evolução Diferencial: Introdução e Conceitos Básicos," 2009. [Online]. Available: ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia707_1s11/notas_de_aula/topico12_IA707_1s11.pdf. [Accessed: 10-Dec-2018].