# ANÁLISE DO MÉTODO DAS POSIÇÕES DE FALTA PARA ALOCAÇÃO DE MONITORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O NSGA-II

Sávio M. Carneiro<sup>\*</sup>, Ricardo de A. L. Rabêlo<sup>\*</sup>, Fabbio Anderson Silva Borges<sup>\*</sup>, Hermes M. G. C. Branco<sup>†</sup>

\* Universidade Federal do Piauí Teresina, Piauí, Brasil

<sup>†</sup>Universidade Estadual do Piauí Teresina, Piauí, Brasil

Emails: saviomotac@gmail.com, ricardoalr@ufpi.edu.br, fabbioanderson@gmail.com, hermescb@uespi.br

**Abstract**— This paper presents a comparative study between two methodologies that uses the Fault Positions Method to solve the problem of allocation of power quality monitors in distribution systems. Multiobjective optimization techniques were used to provide solutions that minimize the costs of monitoring and the amount of unmonitored voltage sags. For this, the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II was employed. The obtained results showed an excellent performance of one of the proposed methods, allowing the total coverage of the sags occurred in the distribution system analyzed.

Keywords— Fault Position Method, Monitors Allocation and Power Quality

**Resumo**— Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas metodologias que utiliza o Método das Posições de Falta para resolver o problema de alocação de monitores de qualidade de energia elétrica em sistemas de distribuição. Foram utilizadas técnicas de otimização multiobjetivo visando fornecer soluções que minimizem o número de monitores e a quantidade de afundamentos de tensão não monitorados. Para isso, o algoritmo Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II foi empregado. Os resultados obtidos mostraram um excelente desempenho de um dos métodos propostos, possibilitando a cobertura total dos afundamentos de tensão ocorridos no sistema de distribuição analisado.

Palavras-chave— Alocação de Monitores, Método das Posições de Falta e Qualidade da Energia

#### 1 Introdução

Afundamentos de tensão são eventos caracterizados pela redução repentina do valor eficaz da tensão nominal, entre 0,9 e 0,1 p.u. com duração máxima de 1 minuto (IEEEStd1159, 2009). Na prática, esses distúrbios estão frequentemente associados a curto-circuitos no sistema e sua duração depende do tempo de resolução da falta (Zambrano et al., 2017).

Em um Sistema Elétrico de Potência (SEP), os afundamentos de tensão são considerados um dos mais sérios problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), pois são os eventos que ocorrem com mais frequência na rede elétrica e, por consequência, correspondem a uma importante fonte de perdas financeiras para os consumidores, principalmente os industriais. Por essa razão, é de extrema importância avaliar e mensurar os impactos desse evento no SEP.

A fim de tornar mais claro os impactos causados por esses distúrbios, o estudo desenvolvido por Targosz and Manson (2007) relevou que o setor industrial da União Europeia perde anualmente cerca de 4% (145,1 bi de euros) do seu volume de negócios por causa dos problemas associados a baixa QEE. Desse total, 58% (85 bi de euros) são causados por afundamentos de tensão ou pequenas interrupções.

Devido a importância desse tema, existem na

literatura diversos métodos que visam entender, diagnosticar ou diminuir os impactos desses distúrbios, tais como: Método das Posições de Falta (MPF) (Conrad et al., 1991), Método das Distâncias Críticas (Bollen, 1998), Método de Monte Carlo (Faried and Aboreshaid, 2003; Martinez and Martin-Arnedo, 2004) e Métodos Analíticos (Moschakis and Hatziargyriou, 2006; Espinosa-Juarez et al., 2009).

Dentre esses métodos, o MPF destaca-se pela sua ampla utilização no cálculo de afundamentos de tensão em SEP's e pela sua aplicabilidade tanto em sistemas malhados (como os de transmissão), como nos sistemas radiais (como os de distribuição) (Goswami et al., 2008; Carpinelli et al., 2009).

De modo complementar, o MPF pode ser utilizado para auxiliar na alocação dos monitores de qualidade de energia, uma vez que, como resultado, esse método produz uma matriz de tensão durante a falta (MTDF), que permite evidenciar as áreas de vulnerabilidade do sistema. Por consequência é possível, a partir de algoritmos computacionais ou análise do especialista, determinar os melhores pontos de instalação dos equipamentos, como em Carneiro et al. (2018), Branco et al. (2018) e Kempner et al. (2014).

Os trabalhos correlatos tendem, em sua maioria, analisar de forma isolada cada matriz relacionada a um o tipo de falta analisada, determinando em cada caso a influência da propagação do afundamento de tensão e a área de vulnerabilidade do sistema.

Porém, o tipo da falta influencia o comportamento desse distúrbio no SEP. Assim, ao se considerar apenas curto-circuitos trifásicos, eventos mais críticos, o número de monitores pode ser sobredimensionado, uma vez que o distúrbio é sentindo de forma mais severa em quase todos os pontos do sistema. Por outro lado, se for considerado apenas curto-circuitos monofásicos, afundamentos em outras fases podem não ser percebidos.

Dessa forma, se o objetivo do estudo de alocação for a cobertura total dos eventos ocasionados por diferentes tipos de falta, a matriz resultante do MPF não deve ser analisada considerando um tipo de falta isolado, mas sim uma análise concomitante de todas as matrizes resultantes. O resultado da aplicação do MPF para mais de um tipo de falta produz um conjunto de dados a serem analisados e a forma como eles são trabalhados impacta diretamente no estudo de afundamentos de tensão.

Este artigo apresenta uma análise comparativa entre duas metologias possíveis para manipulação desses dados. O algoritmo Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) (Deb et al., 2002) foi empregado para a obtenção dos esquemas de monitoramento. O objetivo final de cada metodologia é garantir a cobertura total dos eventos ocorridos nos sistemas com a menor quantidade de equipamentos possível. Para a avaliação das abordagens, foi utilizado o sistema de testes de 37 barras do IEEE (Kersting, 1991) modelado no software de simulação DigSILENT Power Factory 15.1 (GmbH, 2013).

A principal contribuição deste trabalho é o estabelecimento de um modelo de alocação que seja capaz de garantir a cobertura total dos afundamentos de tensão independente do tipo de falta ocorrida no SD com a menor quantidade de equipamentos possíveis.

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 traz os conceitos fundamentais para o entendimento da abordagem. A Seção 3 explica as duas metodologias utilizadas. Em seguida, os resultados obtidos são apresentados na Seção 4. Finalizando o artigo, a Seção 5 apresenta as conclusões.

## 2 Referencial Teórico

Nesta sessão, os conceitos fundamentais para o entendimento do trabalho são apresentados: O Método das Posições de Falta na subseção 2.1 e a abordagem utilizada na alocação de monitores na subseção 2.2.

### 2.1 Método das Posições de Falta

O Método de Posição de Falta (Conrad et al., 1991) foi proposto para o cálculo de afundamentos de tensão em sistemas de transmissão de grande porte. Este método consiste na simulação de um curto-circuito em cada uma das barras do sistema (uma por vez), seguido do cálculo das tensões remanescentes em todas as demais barras. Desta forma, para qualquer situação de falta em um nó (ou barra) do sistema é possível determinar os valores de tensão em cada barra.

A Figura 1 ilustra o fluxograma do algoritmo do método das posições de falta, conforme o qual, a cada posição de falta F (geralmente uma barra do sistema) é simulada uma situação de curtocircuito e as tensões em todas as outras barras do sistema são calculadas e armazenadas. O algoritmo é executado até que todas as posições das faltas sejam contempladas, ou seja, até que tenha sido realizado o cálculo do curto-circuito em todas as barras desejadas.



Figura 1: Fluxograma do algoritmo do método das posições de falta.

De posse das tensões remanescentes, é construída a Matriz de Tensões Durante a Falta, na qual as colunas possibilitam determinar as áreas afetadas pelas faltas aplicadas em cada uma das barras. Assim, essa área determina toda a região em que, caso ocorra uma falta na barra k, ocorrerá afundamento de tensão com intensidade suficiente para afetar a operação dos equipamentos conectados ao sistema (Olguin and Bollen, 2003).

Por sua vez as linhas possibilitam determinar

a área de vulnerabilidade de cada barra identificando a região em que, caso ocorra uma falta, acarretará em um afundamento de tensão na barra k com intensidade suficiente para afetar a operação de equipamentos conectados a mesma (Olguin and Bollen, 2003).

#### 2.2 Alocação de Monitores baseada no MPF

A área de vulnerabilidade representada na MTDF pode ser utilizada para determinar a quantidade de afundamentos detectados por um conjunto de monitores. Esse é o princípio básico adotado neste trabalho para calcular o quão bom é um dado esquema de monitoramento.

Para realizar esse cálculo, cada elemento da MTDF é comparado a um limiar t, definido preliminarmente. O resultado é então armazenado na Matriz de Cobertura (MC), de mesma dimensões da MTDF e que indica em quais pontos do SD ocorrem afundamentos de tensão segundo o limiar definido, obedecendo a Equação 1.

$$mc_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ se } mtdf_{ij} < t \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$
(1)

Na sequência o vetor de alocação X de n elementos é definido, indicando a localização dos monitores em cada um dos n barramentos do SD. Os valores do vetor X são determinados pela Equação 2.

 $x_i = \begin{cases} 1, \text{ se existe monitor instalado na barra } b_i \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$ 

Em seguida o produto interno entre a MCe o vetor de alocação (X) é realizado, conforme Equação 3, o que irá resultar no vetor de observabilidade (V), no qual as posições com valores maiores que zero representam as barras em que os afundamentos de tensão podem ser monitorados pelos monitores alocados, considerando o limiar estabelecido.

$$V = MC \cdot X \tag{3}$$

(2)

Contudo, é importante ressaltar que nem todas as posições do vetor V com valor igual a zero implicam, necessariamente, em afundamentos de tensão não monitorados. Um elemento  $v_i$  pode ser igual a zero porque todos os elementos de uma linha da matriz MC são iguais a zero também, o que resulta de não haver afundamentos de tensão naquela linha da matriz MC com valores abaixo do limiar estabelecido. Portanto, é fundamental garantir que esta situação não influencie na determinação da quantidade de afundamentos de tensão que não são percebidos por um arranjo de monitores. Esta garantia pode ser obtida pela multiplicação da matriz MC por um vetor que possua todas as posições iguais a 1, como mostra a Equação 4. O resultado possibilita afirmar que se alguma posição do vetor de vulnerabilidade ( $\overline{V}$ ) for igual a zero é devido ao fato desta linha da matriz MC ter todos os elementos iguais a zero, indicando que nenhuma barra sofre afundamento de tensão (considerando o limiar de estudo) quando um curto-circuito for realizado na barra de igual posição do vetor  $\overline{V}$ .

$$\overline{V} = MC \cdot 1 \tag{4}$$

Dispondo dos vetores  $V \in \overline{V}$ , o número de barras do SD nas quais os afundamentos de tensão podem ser monitorados, considerando o cenário de localização fornecido por X, é dado pela Equação 5, formando o vetor de afundamentos não monitorados (U):

$$u_i = \begin{cases} 1, \text{ se } v_i = 0 \text{ e } \overline{v}_i > 0\\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$$
(5)

na qual as posições com valor igual a 1 indicam as barras em que ocorrem afundamentos de tensão que não serão observados por nenhum monitor instalado. O somatório dos valores dos elementos do vetor U indicam o número de afundamentos de tensão não cobertos por um conjunto de monitores representado pelo vetor X.

#### 3 Abordagens consideradas

A aplicação do método descrito na Subseção 2.1 para um dado tipo de falta irá resultar em apenas uma MTDF. Contudo, como o objetivo deste trabalho é garantir a cobertura total dos afundamentos de tensão ocasionados por qualquer tipo de falta, são estudados diferentes MTDF's, as quais são relacionadas com diferentes tipos de falta. A forma como essas matrizes são incorporadas na função objetivo impacta diretamente os resultados obtidos no problema multiobjetivo (PM).

Por esse motivo, dois métodos foram propostos e analisados neste artigo: o primeiro considera a utilização de apenas uma matriz, obtida por meio da agregação das demais, e o segundo considera todas as matrizes de forma individual, combinando posteriormente os resultados. O detalhamento de cada um dos métodos é apresentado nas subseções seguintes.

## 3.1 Método 1: Agregação das MTDF

Neste método, as diferentes matrizes são combinadas de forma a gerar apenas uma matriz ( $M_{final}$ ) que será empregada na formulação do PM. Para isso, um operador de agregação deve ser definido e aplicado em cada posição das matrizes. Neste trabalho foram utilizados os operadores: média, mínimo, máximo e mínimo-limitado, conforme o detalhamento a seguir.

- **Operador Média**: Realiza o cálculo da média dos elementos de todas as matrizes consideradas para criar a  $M_{final}$ .
- **Operador Mínimo**: Calcula o menor elemento de cada posição de todas as matrizes e armazena-o na  $M_{final}$ .
- Operador Máximo: Calcula o maior elemento de cada posição de todas as matrizes e armazena-o na M<sub>final</sub>.
- **Operador Máximo-Limitado**: Determina um valor limite (*l*) e calcula o maior elemento de cada posição de todas as matrizes abaixo do limite definido, armazena-o na *M*<sub>final</sub>.

De posse da  $M_{final}$  o procedimento da Subseção 2.2 é aplicado resultando no vetor  $U_{final}$ . Assim, as funções objetivos para o primeiro método são expressas nas Equações 6 e 7.

1. Minimizar o número de monitores utilizados:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i$$
 (6)

2. Minimizar o número de afundamentos não monitorados:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n u_i$$
 (7)

onde n é o número de barras do sistema.

## 3.2 Método 2: Consideração das MTDF's distintas

No segundo método, o procedimento descrito na Subseção 2.2 foi aplicado para cada tipo de falta considerado, resultando em um conjunto de vetores de afundamentos não monitorados ( $TF = (U^{Mon_A}, U^{Mon_B}, U^{Mon_C}, U^{BiFF_{AB}}, U^{BiFF_{AC}}, U^{BiFF_{AC}}, U^{BiFF_{AC}}, U^{BiFF_{AC}}, U^{BiFF_{AC}}, U^{BiFFT_{AC}}, U^{BiFFT_{BC}}, U^{TriFFF}$  e  $U^{TriFFFT}$ )).

Desta forma, as funções objetivos para o segundo método são expressas nas Equações 8 e 9.

1. Minimizar o número de monitores utilizados:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i$$
 (8)

2. Minimizar o número de afundamentos não monitorados:

$$f_2(x) = \sum_{i \in TF} \sum_{j=1}^n u_{ij}$$
(9)

onde n é o número de barras do sistema.

Um ponto importante de se observar é que tanto neste método como no anterior, os objetivos definidos possuem uma natureza conflitante, já que ao reduzir o número de monitores (menor custo), a quantidade de áreas cobertas no SD tende a diminuir, enquanto que aumentando o número de equipamentos (e consequentemente o custo), mais áreas serão monitoradas.

### 4 Resultados

Para fins de validação, os métodos propostos neste trabalho foram testados no circuito alimentador de 37 barras do IEEE. O comportamento do SD, em face as ocorrências de faltas, foi simulado no software DigSILENT Power Factory 15.1. Em todas as simulações a impedância de falta considerada foi igual a 0 ohms (curto-circuito franco). Foram realizados estudos para os limiares t de 0,6; 0,7; 0,8 e 0,9 p.u. para verificar as respostas dos métodos diante dos cenários propostos.

As funções objetivos descritas nas Subseções 3.1 e 3.2 foram implementadas no NSGA-II, que foi escolhido devido a sua eficiência com problemas de natureza combinatória, como o proposto neste trabalho. Os parâmetros do NSGA-II foram ajustados conforme a Tabela 1 e foram definidos por meio de experimentações realizadas na fase inicial a fim de se obter os valores considerados satisfatório para a execução deste PM.

Tabela 1: Parâmetros utilizados no NSGA II.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	500
Quantidade de gerações	100
Método de seleção	Torneio de 16
Método de <i>crossover</i>	Single Point
Probabilidade de <i>crossover</i>	0,75
Método de mutação	Bit Flip
Probabilidade de mutação	0,01

Inicialmente cada um dos métodos foi aplicado no SD para se obter a localização dos monitores. Posteriormente, os monitores foram configurados no DigSILENT Power Factory 15.1 e foram simulados, em todas as barras, curtos-circuitos monofásicos (fases A, B e C), bifásicos FF (fases AB, AC, BC), bifásicos FFT (fases AB, AC, BC) e trifásicos FFF e FFFT, com objetivo de verificar se o esquema de monitoramento obtido consegue de fato cobrir todas as possibilidades de ocorrência de afundamentos de tensão.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos pelo Método 1. Pela análise dos seus dados é possível verificar que apenas o operador máximo limitado foi capaz de cobrir todos os eventos ocorridos para o limiar t de 0,6 p.u., porém o número de equipamentos (cinco monitores) foi bem maior do que os utilizados nos demais operadores (um e dois monitores) para o mesmo limiar. Esse desempenho não é observado quando o estudo considera afundamentos menos severos (limiar acima de 0,6 Tabela 2: Resultados obtidos para o Método 1, evidenciando o Limiar (t), o operador, número de equipamentos (NEqu), quantidade de afundamentos monitorados (Mon) e não monitorados (NMon).

#	t	Operador	NEqu	Mon	NMon
1	$0,\!6$	Média	1	1923	10185
2	$0,\!6$	Mímino	2	12053	55
3	$0,\!6$	Máximo	1	1923	10185
4	$0,\!6$	Máximo	5	5 12108	
		limitado			
5	0,7	Média	7	15716	3
6	0,7	Mímino	Mímino 2 15716		3
7	0,7	Máximo	1	3402	12317
8	0,7	Máximo	3	15716	3
		limitado			
9	$0,\!8$	Média	3	19573	3
10	$0,\!8$	Mímino	2	19573	3
11	$0,\!8$	Máximo	1	9047	10529
12	$0,\!8$	Máximo	2	19573	3
		limitado			
13	0,9	Média	2	23697	3
14	0,9	Mímino	1	23697	3
15	0,9	Máximo	1	20342	3358
16	0,9	Máximo	1	23697	3
		limitado			

p.u.). Em todos os demais cenários, pelo menos três eventos deixaram de serem observados pelos monitores instalados no sistema.

Já para o Método 2, os resultados apontam a cobertura total dos afundamentos em todos os cenários avaliados, conforme os dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados obtidos para o Método 2, evidenciando o Limiar (t), o número de equipamentos (NEqu), quantidade de afundamentos monitorados (Mon) e não monitorados (NMon).

#	t	NEqu	Mon	NMon
1	$0,\!6$	4	12108	0
2	0,7	3	15719	0
3	$0,\!8$	3	19576	0
4	0,9	2	23700	0

A diferença observada entre os dois métodos pode ser justificada pelo fato de que no Método 1, ao agregar os valores, ocorre a criação/alteração de informações que não correspondem ao comportamento fidedigno do SD. Por isso, ao considerar todas as MTDF's de forma independente, o Método 2 consegue um melhor resultado, pois suas decisões baseiam-se no comportamento real do sistema.

Portanto, a utilização do Método 1 é útil quando existe uma tolerância para o monitoramento dos eventos ocorridos. Quando essa tolerância não existir, sendo obrigatório a escuta de todos os eventos da rede, o Método 2 deve ser o escolhido.

## 5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um estudo comparativo entre duas metodologias propostas que se utilizam do Método das Posições de Falta para resolver o problema de alocação de monitores de qualidade de energia elétrica em sistemas de distribuição.

Foram utilizadas técnicas de otimização multiobjetivo visando fornecer soluções que minimizem o número de monitores e a quantidade de afundamentos de tensão não monitorados. Para isso, o algoritmo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* foi empregado.

Como resultado, o Método 1 apresentou um comportamento satisfatório em alguns cenários testados, no entanto só foi capaz de cobrir todos os afundamentos de tensão ocorridos em um dos quatro estudos propostos. Já o Método 2 conseguiu cobrir todos os eventos ocorridos independente do cenário analisado, sendo este o método que deverá ser escolhido para os casos em que a cobertura total dos afundamentos de tensão seja uma regra do sistema.

Como trabalho futuro, pretende-de estender a abordagem para englobar diferentes impedâncias de falta visando verificar a eficácia dos métodos propostos diante de cenários diversificados de curto-circuitos.

#### Referências

- Bollen, M. H. J. (1998). Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags, *IEE Proceedings - Generation, Transmission* and Distribution **145**(1): 70–76.
- Branco, H., Oleskovicz, M., Coury, D. and Delbem, A. (2018). Multiobjective optimization for power quality monitoring allocation considering voltage sags in distribution systems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **97**(Supplement C): 1 – 10.
- Carneiro, S. M., Rabelo, R. d. A. L. and Branco, H. M. G. C. (2018). A multi-objective approach for optimized monitoring of voltage sags in distribution systems, *Journal of Control*, *Automation and Electrical Systems*.
- Carpinelli, G., Perna, C. D., Caramia, P., Varilone, P. and Verde, P. (2009). Methods for assessing the robustness of electrical power systems against voltage dips, *IEEE Transactions on Power Delivery* 24(1): 43–51.

- Conrad, L., Little, K. and Grigg, C. (1991). Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips, *IEEE Transactions on Industry Applications* 27(1): 167–172.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, *IEEE Transacti*ons on Evolutionary Computation 6(2): 182– 197.
- Espinosa-Juarez, E., Hernandez, A. and Olguin, G. (2009). An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors, *IEEE Transactions on Power Delivery* 24(4): 2034–2042.
- Faried, S. O. and Aboreshaid, S. (2003). Stochastic evaluation of voltage sags in series capacitor compensated radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* 18(3): 744–750.
- GmbH, D. (2013). Digsilent powerfactory 15.1. 2013.
- Goswami, A. K., Gupta, C. P. and Singh, G. K. (2008). The method of fault position for assessment of voltage sags in distribution systems, *IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 1–6.
- IEEEStd1159 (2009). Ieee recommended practice for monitoring electric power quality, *IEEE* Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995) pp. c1-81.
- Kempner, T. R., Oleskovicz, M. and Santos, A. Q. (2014). Optimal allocation of monitors by analyzing the vulnerability area against voltage sags, 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 536–540.
- Kersting, W. (1991). Radial distribution test feeders, *IEEE Transactions on Power Systems* 6(3): 975–985.
- Martinez, J. A. and Martin-Arnedo, J. (2004). Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program, *IEEE Transactions on Power Delivery* 19(4): 1975– 1982.
- Moschakis, M. N. and Hatziargyriou, N. D. (2006). Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags, *IEEE Transacti*ons on Power Delivery 21(3): 1727–1734.
- Olguin, G. and Bollen, M. H. J. (2003). Stochastic assessment of unbalanced voltage dips in

large transmission systems, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,, Vol. 4, pp. 8 pp. Vol.4–.

- Targosz, R. and Manson, J. (2007). Pan european lpqi power quality survey, 19th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Vienna.
- Zambrano, X., Hernandez, A., Izzeddine, M. and castro, R. M. D. (2017). Estimation of voltage sags from a limited set of monitors in power systems, *IEEE Manchester Power-Tech*, pp. 1–1.