

# Localização de Falhas de Alta Impedância em Alimentadores de Distribuição Utilizando Busca Exaustiva

Carla F. Cavalari\*. Caio O. Mussi\*\*  
Débora R. R. P. Araujo\*\*\*. Leandro R. Araujo\*\*\*\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil  
(e-mail: carla.cavalari@engenharia.ufjf.br).

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil  
(e-mail: caio.mussi@engenharia.ufjf.br).

\*\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil  
(e-mail: debora.rosana@ufjf.edu.br).

\*\*\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil  
(e-mail: leandro.araujo@ufjf.edu.br).

---

**Abstract:** The location of high impedance faults (HIFs) is a challenge in power distribution systems, since the loads and phases are generally unbalanced resulting in zero sequence currents and the fault currents are of low intensity, as a result, conventional protection systems are often unable to detect the defect. This work presents a method to locate single-phase high impedance faults based on an exhaustive search from a database, which was built through simulations of different scenarios using RMS voltage and current values. The developed algorithm calculates the approximate distance of the HIF in relation to the beginning of the feeder. The method was tested with the IEEE 34-bus system and proved to be quite accurate.

**Resumo:** A localização de faltas de alta impedância (ou *high impedance faults* - HIFs) é um desafio em sistemas de distribuição de energia, já que as cargas e fases geralmente são desequilibradas resultando em correntes de sequência zero e as correntes de defeito são de baixa intensidade, com isto, os sistemas convencionais de proteção muitas vezes não são capazes de detectar o defeito. Este trabalho apresenta um método para localizar faltas de alta impedância monofásicas baseado em busca exaustiva a partir de um banco de dados, o qual foi construído através de simulações de diversos cenários usando valores de tensão e corrente RMS. O algoritmo desenvolvido calcula a distância aproximada da HIF em relação ao início do alimentador. O método foi testado com o sistema IEEE 34 barras e se mostrou bastante preciso.

**Keywords:** High impedance fault; Fault location; Distribution feeders; Distribution systems; Exhaustive search.

**Palavras-chaves:** Falta de alta impedância; Localização de faltas; Alimentadores de distribuição; Sistema de distribuição; Busca exaustiva.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Falta de alta impedância (*High impedance faults* - HIF) é um tipo de defeito em que a impedância possui um valor suficientemente alto, de modo que a corrente de defeito seja uma parcela da ordem que os valores normais de operação de um sistema de distribuição. Como consequência, este tipo de defeito não é facilmente detectado e localizado pelos dispositivos convencionais de proteção contra sobrecorrente das redes de distribuição, diferentemente dos defeitos sólidos ou de baixa impedância.

O método da busca exaustiva, ou busca por força bruta, foi concebido para solução de problemas de otimização onde as variáveis assumem valores inteiros, portanto constituem um espaço finito de soluções possíveis, consistindo na enumeração de todos os candidatos de solução de um

problema, seguida pela avaliação da viabilidade e otimalidade de tais candidatos, segundo um critério de avaliação (função objetivo). As vantagens do método são a sua simplicidade de implementação e garantia de encontrar a solução ótima, dado que ela exista, porém, o esforço computacional é proporcional ao número de variáveis do problema, o que pode levar a tempos de execução demasiadamente longos, se tornando inviável dependendo da aplicação à qual é utilizado.

Devido às dificuldades inerentes de detecção e localização de HIFs, os métodos comumente preconizados atualmente o uso de técnicas inteligentes em combinação com técnicas avançadas de processamento de sinais.

Para localização de HIFs, Farias et al. (2018) utiliza de uma função polinomial de quarta ordem para modelar a tensão no ponto de falta, em função da corrente de falta, em conjunto

com uma rede neural artificial, responsável por estimar parâmetros desconhecidos das equações, para resolução do equacionamento do alimentador durante falta.

Fazendo uso de um método de processamento de sinal digital de última geração, Bernadić et al. (2012) aplica a transformação Hilbert – Huang a fasores espaciais complexos para calcular os locais de falhas práticas na distribuição, incluindo faltas de alta impedância.

O método apresentado por García-Santander et al. (2005) não se baseia na medição de corrente, como na maioria dos trabalhos, mas sim nos valores da tensão. O método possui duas etapas: determinar se o medidor está à jusante ou à montante da HIF e em seguida determinar a seção do defeito aplicando o algoritmo desenvolvido pelos autores. Este método se mostra interessante se a rede tiver transformadores de baixa tensão.

Senger et al. (2000) desenvolveu um novo sensor sensível ao campo elétrico gerado por alimentadores primários que monitora o desequilíbrio de tensão. O sensor mais próximo ao defeito detecta sua ocorrência e transmite a informação. A localização é feita de forma aproximada pelo sensor mais próximo à falta.

O algoritmo proposto por Petite et al. (2016) foi desenvolvido com o objetivo de detectar e localizar faltas em sistemas de distribuição com geração distribuída utilizando redes neurais artificiais. O método proposto se mostrou eficaz ao identificar o trecho com a falta e identificar o local exato do defeito. A rede neural foi treinada utilizando os valores de tensão nas barras do sistema.

Já no trabalho de Guaracy (2019), a autora compara os seguintes métodos para detecção e localização de faltas de alta impedância utilizando o sistema IEEE 13 barras: Proteção Diferencial de Sequência Zero (PDSZ), Proteção Quasi-Diferencial de Sequência Zero (PQDSZ), Plano Operacional utilizando valores RMS (PO-RMS), Plano Operacional utilizando valores complexos (PO-Complexo), Plano Alfa ABC, Plano Alfa de Sequência Zero e Plano Complexo da PDSZ. A autora simulou diversas impedâncias de falha em locais diferentes, além de variar a carga e incluir geração distribuída no sistema. A localização da área do defeito foi feita por meio das zonas de proteção diferencial.

Levando em consideração efeitos transitórios, Costa et al. (2015) empregou a transformada Wavelet para detecção em tempo real de efeitos transitórios induzidos por HIFs. Partindo para uma análise estatística, Sedighi et al. (2005) utilizou da transformada Wavelet para realizar a decomposição dos sinais e extração de características, sendo a seleção das características realizada pela Análise de Componentes Principais e a classificação feita pelo Classificador de Bayes.

Também utilizando a transformada de Wavelet, Bakar et al. (2014), constrói um banco de dados de referência que contém amostras de coeficientes Wavelet de casos de falta de alta impedância em diferentes seções da linha subterrânea de 11kV. A seção com falta é obtida através da comparação dos coeficientes Wavelet do sinal de tensão da rede e do banco de

dados de referência. A metodologia utilizada na localização de HIFs do presente trabalho se assemelha à usada por Bakar et al. (2014).

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um método de localização de faltas de alta impedância de forma aproximada utilizando a técnica de busca exaustiva. Serão consideradas apenas as faltas monofásicas no alimentador principal. Serão analisados dois cenários com números diferentes de medidores ao longo do alimentador. O sistema teste IEEE 34 barras será utilizado para validar o método.

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA

### 2.1 Sistema Teste

O sistema base que será utilizado para o método é o IEEE 34 Node Test Feeder (IEEE, 2001), como mostra a Fig. 1.

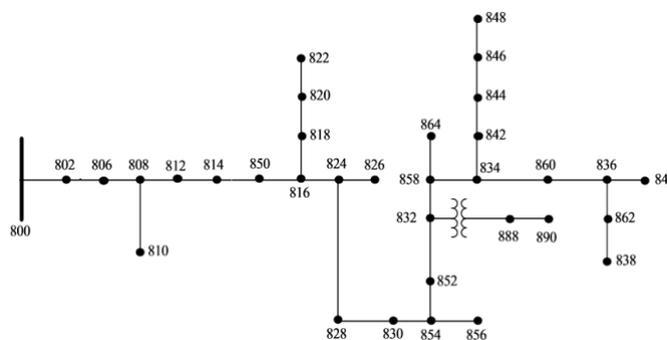


Fig. 1 Sistema IEEE 34 barras modificado.

Todas as cargas do sistema foram como impedância constante, pois a junção de diferentes modelos de cargas na média tensão faz com que seu comportamento durante uma falta se assemelhe a de impedância constante. Os reguladores de tensão também foram desconsiderados, já que poderiam interferir no valor da tensão ao longo do alimentador durante a ocorrência de uma falta e atrapalhar o processo de estimação da localização da HIF. (Mortazavi et al. 2019)

Como a maioria dos defeitos que ocorrem em sistemas de distribuição são do tipo fase-terra, neste trabalho somente faltas monofásicas fase-terra serão analisadas, conforme esquema da Fig. 2. (ELEKTRO 2014)

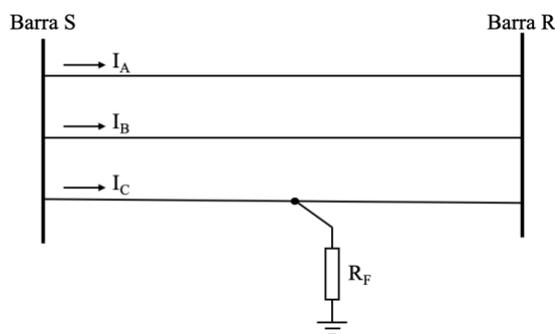


Fig. 2 Falta monofásica fase-terra.

Além disso, considerou-se que a detecção da HIF e da fase já foi feita anteriormente ao processo de localização. Ou seja, sabe-se que há o defeito e em qual fase ele ocorre. A detecção pode ser feita por diversos métodos já conhecidos na literatura, como redes neurais artificiais, por exemplo.

## 2.2 Banco de Dados

Um banco de dados foi criado com várias simulações de HIFs monofásicas com diversos valores conhecidos de resistência de falta (entre 25Ω e 200Ω) ao longo de todo o alimentador principal do sistema (entre a barra 800 e 836). O banco de dados foi construído para armazenar os valores de tensão e corrente medidos pelos medidores ao longo do alimentador, bem como os dados de resistência e distância das faltas simuladas. Estes valores armazenados no banco de dados serão utilizados pelo algoritmo para estimar a localização da falta e sua resistência de falta.

O banco de dados foi construído conforme Tabela 1.  $R_F$  é a resistência da falta simulada,  $D$  é a distância da falta à subestação (barra 800) e as demais correspondem aos valores de tensão e corrente obtidos pelos medidores. Para cada fase da falta, foi criado um banco de dados diferente. Para a criação do banco de dados, utilizou-se o *software* Matlab e o *software* de simulação de circuitos de distribuição OpenDSS.

**Tabela 1. Banco de Dados**

$R_F$	$D$	Med1	Med2	Med3	Med4
-------	-----	------	------	------	------

## 2.3 Função Objetivo

O método utilizado para localização da HIF é uma adaptação do método da busca exaustiva, por isso, uma base de dados é criada tomando combinações de valores possíveis de resistência e distância da falta. Os resultados de cada combinação de valores são avaliados conforme uma função objetivo (FOB) apresentada em (1). Como existem infinitos valores de resistência e distância dentro do intervalo analisado neste trabalho, somente um conjunto de possíveis soluções será analisado. Portanto, uma resposta suficientemente próxima é encontrada, mas não uma solução exata.

Calculou-se o valor da FOB para cada simulação  $i$  do banco de dados (Tabela 1). A FOB é calculada comparando os valores de tensão e corrente dos medidores entre o caso analisado de falta e as simulações do banco de dados.

$$FOB_i = \sum_{n=1}^j (|V_{falta}^n - V_{BD}^n| + |I_{falta}^n - I_{BD}^n|) \quad (1)$$

Onde:  $i$  representa cada linha do Banco de Dados,  $j$  é o número de medidores,  $n$  é o  $n$ ésimo medidor,  $V_{falta}$  é o valor RMS da tensão do caso de falta estudado e  $V_{BD}$  é o valor RMS da tensão simulada no caso  $i$  do banco de dados. De forma similar,  $I_{falta}$  é o valor RMS da corrente medida pelos medidores do caso estudado e  $I_{BD}$  é o valor RMS da corrente simulada no caso  $i$  do banco de dados.

Por fim, ordena-se a FOB do menor para o maior valor e assume-se, assim, que a localização da falta corresponde à distância correspondente ao menor valor da FOB, e do mesmo modo que a resistência da falta.

## 3. RESULTADOS

Os resultados do algoritmo proposto para localização de faltas de alta impedância no sistema IEEE-34 devem ser analisados considerando faltas dentro do intervalo estabelecido. Para isso, serão escolhidos casos de teste de HIFs para validação do método, bem como analisar a influência do número de medidores alocados no alimentador na precisão da distância da falta.

### 3.1 Casos de Teste

Para a validação do método proposto, após a construção do banco de dados, dezesseis casos de teste foram simulados considerando três e quatro medidores ao longo do alimentador principal. As HIFs simuladas possuem valores de resistência, fase e distância da falta diferentes daqueles já presentes no banco de dados e foram escolhidos de forma aleatória, conforme Tabela 2. A variação da carga não foi considerada neste trabalho.

**Tabela 2. Casos de Teste**

Caso	Fase	Resistência (Ω)	Distância (km)
I	B	156	0,73
II	C	39	0,92
III	B	121	4,33
IV	A	29	7,68
V	A	91	11,31
VI	C	113	14,83
VII	B	47	18,74
VIII	B	68	22,65
IX	C	100	27,16
X	C	158	34,17
XI	A	74	38,12
XII	B	131	42,11
XIII	A	176	47,43
XIV	C	190	51,70
XV	C	87	55,21
XVI	B	43	57,24

Para verificar a eficiência do método, o erro da localização da HIF é estimado conforme (2). O cálculo do percentual de erro será normalizado em relação ao comprimento total do alimentador, cujo valor é de 57,42km.

$$E_D (\%) = |D_{falta} - D_{algoritmo}| / D_{total} \quad (2)$$

Onde:  $D_{falta}$  é a distância real da falta analisada,  $D_{algoritmo}$  é a distância estimada da falta pelo algoritmo e  $D_{total}$  é a distância total do alimentador principal.

### 3.2 Três Medidores

Para validação do algoritmo, foram consideradas as medições RMS de tensão e corrente de três medidores localizados logo a jusante das barras 800, 850 e 854. A medição na saída da subestação de distribuição é representada pelo medidor na barra 800. Os medidores nas barras 850 e 854 correspondem as distâncias (vista da subestação) de 31,63km e 41,48km, respectivamente. Os medidores foram alocados de forma centralizada no alimentador e próximo das grandes cargas do sistema, ressalta-se que a localização ótima dos medidores não é a proposta deste trabalho. Os medidores não-fasoriais foram escolhidos para o teste do método porque são mais baratos e, na maioria das vezes, estes medidores já estão instalados nos sistemas de distribuição, pois são amplamente utilizados pelas concessionárias de energia.

Considerando os três medidores, os valores de distância e resistência da falta calculados pelo algoritmo proposto, bem como a menor FOB e o erro normalizado, podem ser vistos na Tabela 3.

**Tabela 3. Resultados do Método para 3 Medidores**

Caso	FOB	Resistência ( $\Omega$ )	Distância (km)	Erro
I	6,55	165	0,77	0,06%
II	77,86	45	1,09	0,30%
III	14,35	135	4,82	0,87%
IV	113,21	25	6,64	1,81%
V	9,11	95	11,81	0,88%
VI	2,89	115	15,10	0,47%
VII	18,23	45	17,94	1,40%
VIII	14,32	65	21,63	1,79%
IX	12,83	95	25,77	2,43%
X	74,59	155	33,71	0,81%
XI	90,46	75	38,45	0,57%
XII	153,36	135	41,49	1,09%
XIII	13,22	175	48,04	0,79%
XIV	61,37	195	49,26	4,25%
XV	53,65	85	54,82	0,68%
XVI	85,66	45	57,06	3,22%

Para avaliar o comportamento do algoritmo nos valores próximos da região de menor FOB, a Fig. 3 mostra o gráfico da FOB em função da distância da falta para o caso XIV simulado da Tabela 2, considerando três medidores. A Fig. 4 mostra o gráfico da região de menor FOB em função da resistência da falta para o mesmo caso. O caso XIV foi escolhido como exemplo por apresentar maior erro na estimação da distância da falta. É possível notar que próximo da distância estimada de 49,26km, correspondente ao menor valor da FOB, a função objetivo das possíveis soluções crescem à medida que se distanciam do valor de mínimo.

### 3.3 Quatro Medidores

Para esta nova condição, foram consideradas as medições de quatro medidores: nas barras 800, 850, 854 e 834, usando os valores RMS de tensão e corrente. Como já mencionado, o

medidor na barra 800 corresponde ao início do alimentador na saída da subestação. Os demais medidores nas barras 850, 854 e 834 estão alocados a distância de 31,63km, 41,48km e 55,98km, respectivamente. O quarto medidor foi acrescentado na barra 834 sem modificar a posição dos outros três para que seja possível a comparação dos valores medidos nos quilômetros finais, com o intuito de melhorar os resultados da localização de HIFs no final do alimentador.

Para este cenário com três medidores, os valores resultantes do algoritmo para resistência e distância da HIF, bem como a menor FOB e o erro normalizado, podem ser vistos na Tabela 4.

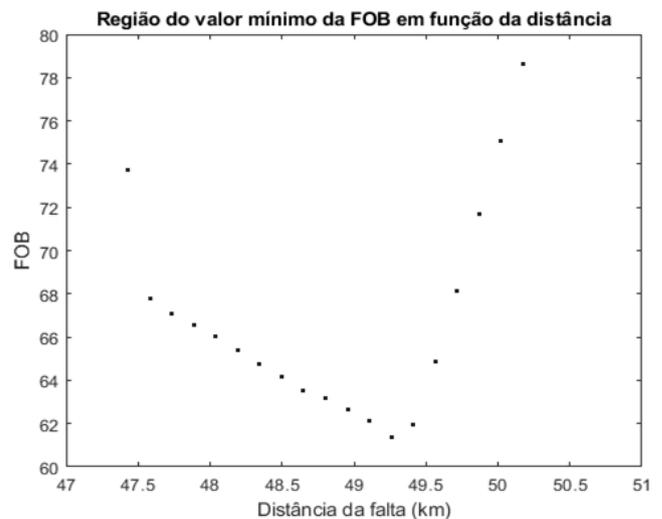


Fig. 3 Gráfico da região de menor FOB em função da distância da falta para o caso XIV com 3 medidores.

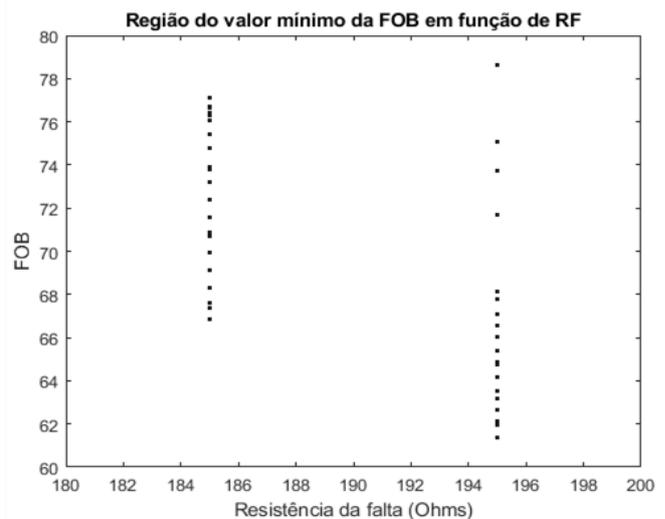


Fig. 4 Gráfico da região de menor FOB em função da resistência da falta para o caso XIV com 3 medidores.

A Fig. 5 mostra o gráfico da região de menor FOB em função da distância da falta para o caso XIV simulado da Tabela 2,

considerando o cenário com quatro medidores. A Fig. 6 mostra o gráfico da região de menor FOB em função da resistência da falta para o mesmo caso. Percebe-se que a distância estimada em 52,87km corresponde ao mínimo global do processo de busca exaustiva e que a resistência real do caso XIV, cujo valor é 190Ω, está localizada no centro dos possíveis candidatos a resistência de falta.

**Tabela 4. Resultados do Método para 4 Medidores**

Caso	FOB	Resistência (Ω)	Distância (km)	Erro
I	7,25	165	0,77	0,06%
II	91,07	45	1,09	0,30%
III	15,15	135	4,82	0,87%
IV	153,72	25	6,65	1,80%
V	10,71	95	11,81	0,88%
VI	3,19	115	15,10	0,47%
VII	16,98	45	17,94	1,40%
VIII	17,31	65	21,63	1,79%
IX	15,94	95	25,77	2,43%
X	82,49	155	33,71	0,81%
XI	97,41	75	38,60	0,83%
XII	279,29	135	43,16	1,83%
XIII	43,71	175	47,43	0,27%
XIV	176,80	195	52,87	2,04%
XV	242,67	85	54,82	0,68%
XVI	196,06	45	55,99	2,19%

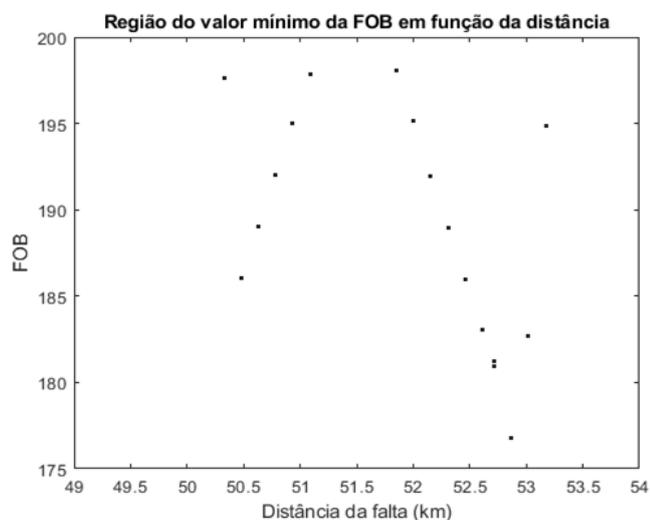


Fig. 5 Gráfico da região de menor FOB em função da distância da falta para o caso XIV com 4 medidores.

### 3.4 Comparação entre o Número de Medidores

A diferença entre o número de medidores provocou certa alteração no valor do erro na maioria dos casos de teste a partir do caso XI com distância de 38,12km, como é possível ver na Fig. 7.

É possível notar que as porcentagens de erros são idênticas ou muito próximas ao longo do alimentador, com exceção de seu trecho final. Como era esperado, ao final do alimentador,

quando há a presença do medidor na barra 834, a precisão da distância da falta é maior, sendo o maior erro cerca de 2,2% considerando o cenário com quatro medidores, enquanto no cenário com três medidores, o maior erro é cerca de 4,2%, correspondendo ao caso XIV.

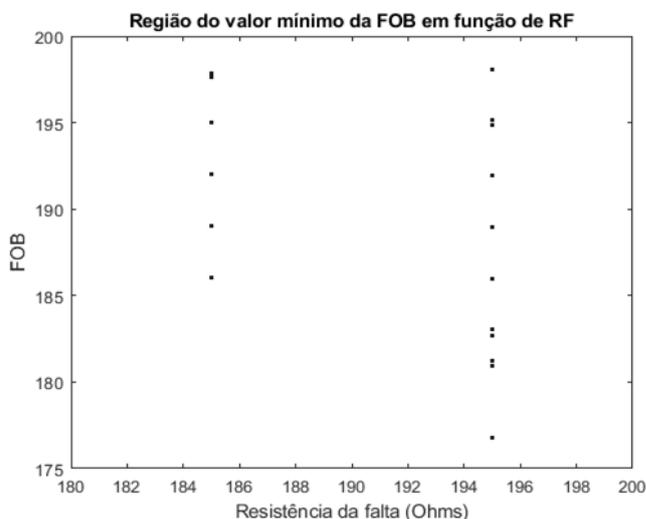


Fig. 6 Gráfico da região de menor FOB em função da resistência da falta para o caso XIV com 4 medidores.

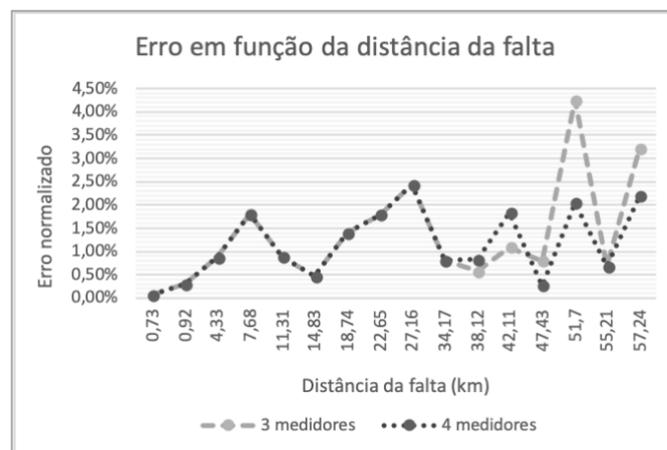


Fig. 7 Gráfico comparativo dos erros normalizados com três e quatro medidores em função da distância da falta.

O caso XIV e o caso XVI apresentaram a maior variação entre o percentual de erro da distância da falta com o acréscimo do quarto medidor, porém o maior valor entre todos os casos estudados foi de 4,25%, o que representa uma distância menor que 2,5km dentre os mais de 57km do trecho do alimentador principal analisado.

## 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um método para localizar defeitos de alta impedância em alimentadores de distribuição usando o método de busca exaustiva modificado. Desta forma, a soma das diferenças absolutas entre os valores RMS de tensão e corrente da rede e do banco de dados são utilizados para estimar a distância do local do defeito à subestação. Já

que o algoritmo utiliza um banco de dados pré-armazenado, o processo de localização da falta é rápido e eficiente.

O método foi simulado utilizando o *software* OpenDSS para o sistema IEEE 34 barras considerando três e quatro medidores. Os resultados dos casos analisados mostram uma boa precisão do método para ambos os cenários, visto que o maior erro obtido é menor que 4,5% e as resistências de falta resultantes do algoritmo se aproximam muito dos casos simulados. A variação do número de medidores não foi significativamente impactante em casos de falta no início do alimentador, mas ocasionou certa diferença no final do alimentador, onde o medidor da barra 834 foi desconsiderado. Em suma, o método proposto se mostrou adequado para a localização de faltas de alta impedância, contudo mais desenvolvimentos devem ser feitos para torná-lo mais eficaz.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a FAPEMIG, a CAPES, o INERGE e à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- Bakar, A.H.A., Ali, M.S., ChiaKwang Tan, Mokhlis, H., Arof, H., Illias, H.A. (2014). High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms. *Electrical Power and Energy Systems*, 55, 723-730.
- Bernadić, A., Leonowicz, Z. (2012). Fault location in power networks with mixed feeders using the complex space-phasor and Hilbert–Huang transform. *Electric Power and Energy Systems*, 42, 208-219.
- Costa, F.B., Souza, B.A., Brito, N.S.D., Silva, J.A.C.B., Santos, W.C. (2015). Real-Time Detection of Transients Induced by High-Impedance Faults Based on the Boundary Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51, 5312-5323.
- ELEKTRO (2014). Norma ND.78 - Proteção de Redes Aéreas de Distribuição. *ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A.*
- Farias, P., de Moraes, A., Rossini, J., Cardoso, G. (2018). Non-linear high impedance fault distance estimation in power distribution systems: A continually online-trained neural network approach. *Electric Power Systems Research*, 157, 20-28.
- García-Santander, L., Bastard, P., Petit, M., Gal, I., López, E., Opazo, H. (2005). Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks. *IEE Proceedings*, 152(2), 180–4.
- Guaracy, P.A. (2019). Comparação entre métodos para detecção e localização da área de falta de alta impedância em sistemas de distribuição. Dissertação de mestrado. *Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica*. Universidade Federal de Juiz de Fora.
- IEEE (2001). 34-Bus Test Feeder - Distribution Test Feeder Working Group. *IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee*.
- Mortazavi, S.H., Moravej, Z., Shahrtash, S.M. (2019). A Searching Based Method for Locating High Impedance Arcing Fault in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34, 438-447.
- Petite, F.S.V., Santos, R.C., Asano, P.T.L. (2016). Aplicação de Redes Neurais Artificiais na Detecção e Localização de faltas em Sistemas de Distribuição. *Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, CILAMCE 2016.
- Sedighi, A.-R., Haghifam, M.-R., Malik, O.P., Ghassemian, M.-H. (2005). High impedance fault detection based on wavelet transform and statistical pattern recognition. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20, 2412-2421.
- Senger, E.C., Kaiser, W., Santos, J.C., Burt, P.M.S., Malagodi, C.V.S. (2000). Broken Conductors Protection System Using Carrier Communication. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(2), 525-520.