

Auxílio à Decisão para a Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição no Contexto das *Smart Grids*

Evandro Agostinho Reche, Jeovane Vicente de Sousa,
Denis Vinicius Coury
Universidade de São Paulo – USP
evandroreche@usp.br, jeovane@usp.br, coury@sc.usp.br

Ricardo Augusto Souza Fernandes
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
ricardo.asf@ufscar.br

Resumo — Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma abordagem complementar para os métodos de localização de falhas em sistemas de distribuição. Esta proposta se dá no contexto das *Smart Grids* e consiste no desenvolvimento de um algoritmo de auxílio à decisão para técnicas convencionais de localização de falhas, capaz de reduzir o problema da múltipla estimação. Tal algoritmo se resume a um pré-processamento de sinais e extração de parâmetros para posterior uso da técnica DAMICORE (*Data Mining of Code Repositories*), visando encontrar relações entre os eventos. O sistema utilizado para a simulação de curtos-circuitos foi o sistema teste IEEE 34 barras e, para este sistema, o algoritmo respondeu com de forma adequada à redução da região de múltipla estimação.

Palavras-chave — DAMICORE, Localização de Falhas, *Smart Grids*.

I. INTRODUÇÃO

As estratégias adotadas pelas concessionárias de distribuição para a eliminação de distúrbios em seus sistemas de energia têm grande impacto nos índices de confiabilidade e na Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Dados apontam que mais de 80% das interrupções de fornecimento de energia para unidades consumidoras acontecem especificamente em redes de distribuição, contribuindo para isso, a topologia radial desses alimentadores [1]. É estimado que em redes aéreas de distribuição, 90% das interrupções no fornecimento sejam causadas devido à atuação do sistema de proteção, em caso de curto-circuito ao longo do alimentador [2].

Neste sentido, para manter o fornecimento da energia ao consumidor, as concessionárias realizam a localização de falhas ao longo do circuito por meio de dados de unidades consumidoras afetadas. Estes dados são obtidos apenas quando algum consumidor da região afetada entra em contato para informar o corte no fornecimento. Assim, os possíveis locais são estimados pela experiência e conhecimento do corpo técnico e, então, uma equipe de manutenção pode ser enviada para encontrar o ponto defeituoso e realizar a manutenção [3], [4].

A observação de que este método é sujeito a uma série de fatores que podem afetar sua eficiência, aliado ao fato de que cada vez mais as agências reguladoras enrijecem os índices de qualidade do serviço, além da possibilidade de otimização recursos técnico-financeiros das concessionárias, criou-se um ambiente que, cada vez mais impulsiona o desenvolvimento de novas técnicas para localização de falhas em Sistemas de Distribuição (SDs) [3], [5], [6].

A abordagem do tema sob a ótica da modernização também considera não apenas uma evolução nos sistemas de medição eletromecânica para sistemas inteligentes de medição, mas também de toda uma infraestrutura para sistemas de controle e

operação inteligentes, principalmente em SDs [7]. Esta concepção introduz o conceito de *Smart Grids*.

Diante deste cenário, onde se vislumbra um SD com uma infraestrutura de *Smart Grid* montada, este artigo apresenta uma metodologia de auxílio à decisão para localização de falhas em ramais de SDs. Esta proposta entra como complemento a técnicas que são vistas como ineficientes para localização de falhas em SDs, como a técnica de determinação da distância pela reatância calculada, que está sujeita a erros com influência do fluxo de carga [8] e múltipla estimação, por exemplo.

Fazendo uso apenas dos sinais analógicos medidos para o tratamento dos dados, o algoritmo proposto faz uso da ferramenta *Data Mining of Code Repositories* (DAMICORE), associado a uma proposta de pré-processamento dos sinais.

A Seção II apresenta uma fundamentação de *Smart Grids* com conceitos e definições. A Seção III apresenta a ferramenta de Mineração de Dados denominada DAMICORE. A Seção IV traz detalhes da metodologia empregada, pré-processamento dos sinais e aplicação da mineração de dados. Os resultados e discussões são apresentados na Seção V. Por fim, a Seção VI destina-se a apresentar as conclusões.

II. FUNDAMENTOS DE SMART GRIDS

Em linhas gerais, *Smart Grid* é o conceito de modernização do sistema elétrico que aborda tudo relacionado ao sistema elétrico entre a geração e o consumo [9]. Na medida em que se adicionam tecnologias *Smart Grid* o sistema torna-se mais flexível e interativo além de ser capaz de fornecer feedback em tempo real. A rede inteligente deve, entre outros: permitir consumidores como agentes ativos, estimular uma melhora na QEE, aumento de confiabilidade no sentido de autodiagnóstico, melhora da eficiência do uso da rede de distribuição, etc.

Atualmente, a operação e manutenção eficientes de SDs são um desafio para concessionárias, pois a complexidade dos SDs é uma característica intrínseca dos mesmos, tais como: leituras analógicas de apenas um terminal, distribuição de cargas ao longo do circuito, ramificação e divisão dos circuitos em ramais laterais (que podem ser monofásicos ou trifásicos), entre outros. Associado a isto, ainda pode-se afirmar que os SDs contemporâneos ainda não dispõem de equipamentos, automação e nível de digitalização elevado [10].

Apesar deste cenário obsoleto, acredita-se que a própria necessidade de modernização do sistema elétrico, juntamente com o estímulo ao uso de fontes de energias renováveis, geração distribuída, preocupações quanto à QEE e rápida localização de falhas para recomposição do sistema, fazem com que a conversão dos SDs em *Smart Grids* seja uma evolução natural do sistema elétrico [11]. Entre os benefícios e esperados por [12] e [13] para um sistema neste contexto, estão:

- Melhores condições de monitoramento do sistema pela concessionária e a consequente melhora na assistência às adversidades;
- Melhora na recomposição automática do sistema em caso de atuação da proteção, e consequente melhora nos índices de QEE e qualidade do serviço prestado;
- Eficiência contra ataques maliciosos através de uma melhor segurança física e segurança cibernética de ponta para manter a integridade, a confidencialidade e a autenticidade dos dados;
- Integração de energias renováveis, incluindo solar e eólica, a níveis que vão desde instalações de consumo a instalações centralizadas;
- Comunicação bidirecional entre o consumidor e a concessionária para que os consumidores finais possam participar ativamente;
- Melhoria da eficiência do mercado de energia elétrica.

O uso de aprendizagem de máquina (Mineração de Dados, Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Algoritmos Genéticos) aplicados aos problemas de identificação, localização e classificação dos distúrbios de QEE têm sido uma constante nas proposições investigativas desses problemas [14]. Nesse sentido, este trabalho aplica uma ferramenta de mineração de dados como forma de auxílio à decisão para técnicas convencionais de estimação de distância de faltas.

III. MINERAÇÃO DE DADOS VIA DAMICORE

O DAMICORE é uma técnica que consiste na combinação de algoritmos que correlacionam dados de arquivos a fim de buscar semelhanças entre os mesmos [15]. Encontradas as similaridades, a ferramenta retorna uma árvore filogenética correlacionando hierarquicamente os arquivos comparados, e a partir da mesma, são formados grupos de arquivos de acordo com o grau de similaridade entre os mesmos [16]. Os algoritmos são assim executados:

- *Normalized compression distance* (NCD) - métrica utilizada para checar similaridades entre arquivos com base no tamanho dos arquivos antes e depois de compactados. A partir da compressão dos arquivos é formada uma matriz quadrada cujo comprimento é igual ao número de arquivos submetidos, onde cada elemento da matriz corresponde à métrica obtida no algoritmo entre o par de arquivos envolvidos. Retornando assim a NCD entre todos os arquivos de entrada do algoritmo [17];
- *Neighbor-Joining* (NJ) - técnica utilizada na construção de árvores filogenéticas. Neste caso, os dados de entradas são os dados obtidos na matriz de distâncias [18];
- *Fast Newman* (FN) - técnica utilizada para detectar grupos em redes complexas. A partir da árvore filogenética obtida anteriormente, este algoritmo reconhece e divide os grupos de arquivos [19].

Os algoritmos referentes às três etapas de execução do DAMICORE estão representados na Fig. 1.

Usando como dados de entrada os arquivos gerados no levantamento de parâmetros, a NCD comprime os arquivos dois a dois, retornando a similaridade entre dois arquivos na proporção da taxa de compressão de ambos (quanto melhor a taxa de compressão, maior a similaridade). Sendo tais dados os parâmetros característicos extraídos de cada evento, possibilita-

se que na etapa de construção da árvore filogenética, os eventos sejam organizados em distintos “ramos” de acordo com sua similaridade, e posterior organização em grupos.

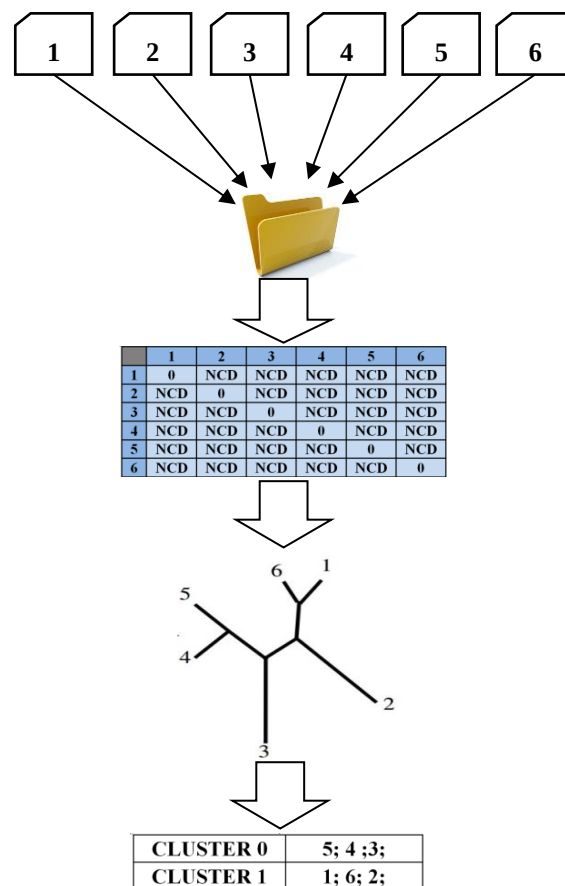


Fig. 1. Exemplo de Execução do DAMICORE (adaptado de [16]).

A árvore, montada com o algoritmo NJ traz a forma como a mineração organiza hierarquicamente os eventos, que estão divididos por cores especificadas. As siglas representadas ao final de cada ramo da árvore são os nomes dos arquivos que foram minerados (previamente pré-processados e organizados em uma pasta).

A última etapa é a formação de *Clusters*, que são os grupos onde estão listados os arquivos mais similares entre si. Neste trabalho os dados de falta disponíveis (corrente e tensão medidos no bay da subestação) são pré-processados, gerando um arquivo característico do evento. A posterior mineração destes arquivos retorna os *Clusters* com os arquivos de faltas mais similares agrupadas.

É importante observar que quanto maiores forem os arquivos a serem minerados, maior será o esforço computacional para a execução do mesmo. Neste sentido, houve uma preocupação em reduzir o número de parâmetros extraídos de cada evento, de modo a reduzir o tamanho do arquivo referente ao mesmo.

IV. AUXÍLIO À DECISÃO EM RELAÇÃO À LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Os métodos de simulação, obtenção dos sinais, processamento e interpretação dos resultados, dependem diretamente da forma como é abordado o tema de localização de faltas em um alimentador de distribuição, e para este trabalho considerou-se que:

- No terminal da subestação de distribuição, o medidor dispõe de grandezas de tensão e corrente trifásicas do alimentador estudado;
- O terminal da subestação dispõe de um localizador de faltas convencional (técnica de reatância).

A proposta aqui apresentada é de um algoritmo que, de posse das medições analógicas, identifique a região da ocorrência do evento, reduzindo assim a área de múltipla estimação dada pelo localizador convencional. A sequência do método é seguida conforme a Fig. 2.

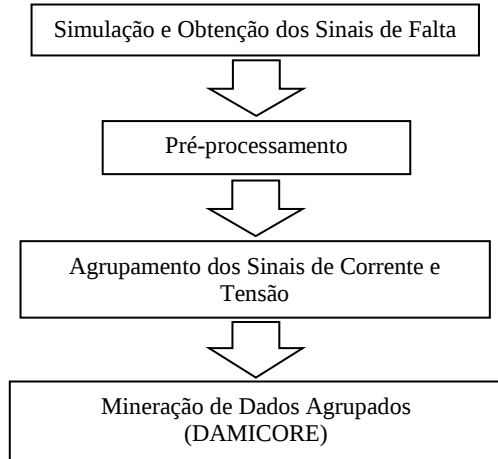


Fig. 2. Visão geral da metodologia proposta.

O sistema teste utilizado foi modelado na interface gráfica do software *ATPDraw* [20]. Este software é capaz de reproduzir a configuração elétrica real das redes, sejam elas de transmissão ou distribuição, além de possibilitar simulações tanto em regime permanente como em transitório para diferentes configurações operacionais [20]. Assim, torna-se possível realizar simulações dos curtos-circuitos e geração de suas oscilografias. Já os algoritmos desenvolvidos neste trabalho foram implementados no software *MATLAB* (R2013a) [21].

A. Sistema teste IEEE 34 barras

O sistema teste IEEE 34 barras foi escolhido por se tratar de um ramal de um alimentador com as seguintes características:

- Tensão nominal do alimentador de 24,9 kV;
- Muito longo e com carregamento leve;
- Dois reguladores de tensão em série;
- Um transformador para reduzir a tensão para 4,16 kV;
- Carregamento desbalanceado com cargas nodais e distribuídas;
- Existência de ramos monofásicos (somente fase A ou fase B);
- Existência de bancos de capacitores.

Tais características expressam certo grau de complexidade a este sistema. Na Fig. 3 é apresentado o diagrama unifilar do sistema teste IEEE 34 barras [22].

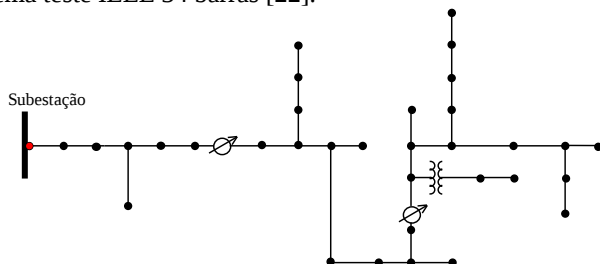


Fig. 3. Sistema teste IEEE 34 barras.

B. Localizador de faltas convencional

Dentre as técnicas de localização de faltas convencionais, alguns autores, como [23] fazem uso do cálculo da reatância do curto-circuito para apontar o possível local da ocorrência. Nesta técnica, são medidos os valores instantâneos de tensão e corrente, onde a reatância pode então ser calculada pela relação entre essas grandezas de acordo com a equação (1):

$$X = \frac{U}{I} \sin \varphi \quad (1)$$

onde, X é a reatância da falta, U é o módulo do fasor de tensão, I é o módulo do fasor de corrente e φ o ângulo de fase entre a tensão e a corrente. Dessa forma, entende-se que a reatância da falta é a própria reatância do trecho de linha até a falta, uma vez que os curtos-circuitos são predominantemente resistivos [24].

Entretanto, quando são consideradas as influências do carregamento do sistema, esta técnica torna-se impraticável. Isso porque a componente reativa da impedância da falta passa a não corresponder mais à reatância da própria linha [8]. Além disso, destaca-se que um alimentador de distribuição com topologia radial, normalmente possui ramos laterais. Desse modo, o uso de medição apenas no bay de entrada da subestação terá ainda mais chances de gerar a múltipla estimação do local da falta, se a técnica empregada for exclusivamente baseada em reatância [25].

C. Simulação e obtenção dos sinais de falta

Para a simulação dos curtos-circuitos no sistema teste IEEE 34 barras foram adotados os seguintes critérios:

- 5 pontos de falta igualmente espaçados para cada trecho sem carga;
- 10 pontos de falta igualmente espaçados para cada trecho com carga no meio;
- Distância mínima entre pontos de falta de 50 metros;
- Em cada ponto de falta de ramo trifásico foram simulados 11 tipos de falta (AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC e ABCT);
- Resistências de falta variando randomicamente entre 1 e 25 ohms;
- Ângulo de incidência da falta variando randomicamente entre 0 e 180 graus.

Seguindo estes critérios, tem-se um total de 1613 faltas simuladas. Um Registrador de Distúrbio (medidor) foi alocado na entrada de linha do ramal do SD estudado. Suas características são:

- Taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo;
- Capacidade de memória para armazenar 500 ms de oscilografia;
- Capacidade de detecção de afundamento de tensão;

D. Pré-processamento

Neste trabalho, a etapa de pré-processamento compreende o registro das grandezas analógicas de pré-falta e de pós-falta, organização destas grandezas e seleção dos parâmetros principais de cada evento, de modo a reduzir a complexidade dos dados e aumentar sua consistência. Um fluxograma com a sequência destas etapas é apresentado na Fig. 4.

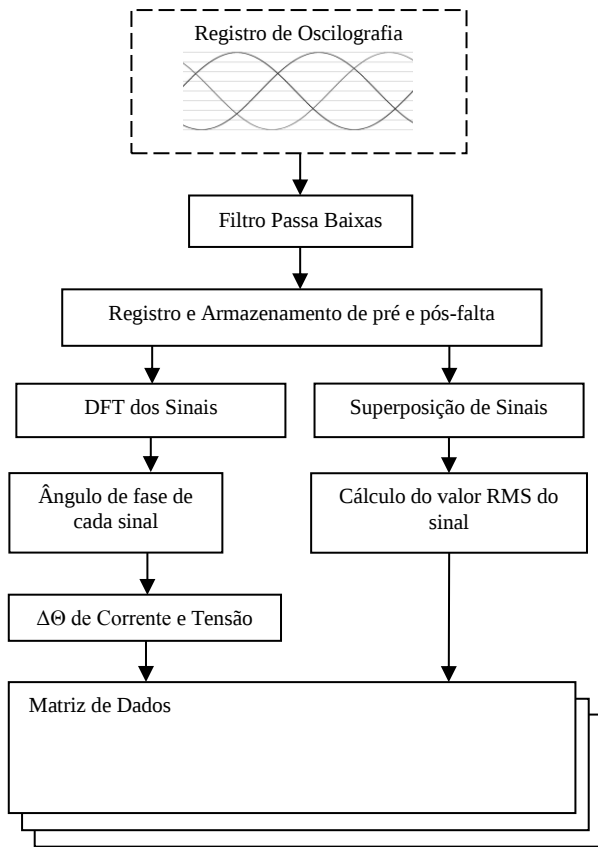


Fig. 4. Fluxograma do pré-processamento proposto

Destaca-se que parte da etapa do pré-processamento do sinal analógico é realizada no medidor que o registra, com o objetivo principal de reduzir o tamanho do pacote de dados a ser minerado. Além disso, todos os cálculos realizados pelo medidor exigem baixo esforço computacional. Assim, as principais etapas do pré-processamento realizado no medidor são:

- Registro de Oscilografia - deve partir de um *trigger* externo (atuação do sistema de proteção externo), via elétrico ou GOOSE, por exemplo. Durante o registro também é obtido o instante de tempo em que ocorreu o *trigger*. A memória volátil do medidor deve armazenar pelo menos 250 ms de oscilografia de pré-falta;
- Filtro passa-baixas - eliminar a possível presença de harmônicos nos sinais. Trata-se de um filtro *Butterworth* com frequência de corte de 120 Hz e terceira ordem;
- Registro de Pré e pós-falta - as 256 primeiras amostras do evento formam o ciclo de pré-falta. O ciclo de pós-falta se refere ao segundo ciclo após o *trigger* do evento;
- DFT dos Sinais - é realizada a Transformada Discreta de Fourier para cada fase de cada sinal;
- Ângulo de fase - com o sinal decomposto pela DFT, é calculada a defasagem de cada fase, com relação a uma fase de referência. Procedimento feito tanto para o ciclo de pós-falta como para o ciclo de pré-falta;
- $\Delta\theta$ de Corrente e Tensão - de posse dos ângulos de fase de cada sinal, é calculada a diferença do ângulo de fase entre pré e pós-falta para cada fase,

de cada grandeza (tensão e, quando possível, corrente);

- Superposição de Sinais - consiste basicamente em calcular a diferença entre o sinal de pré-falta e pós-falta por fase. Este cálculo é feito amostra a amostra. O resultado que se tem é a redução de dois eventos em um;
- RMS do sinal - é realizado o cálculo do valor eficaz de cada fase da componente superposta;
- Matriz de Dados - é o conjunto de informações que caracterizam um evento visto pelo medidor. Esta matriz tem como padrão 3 linhas (uma por fase) e 2 colunas (uma para a diferença de ângulos e outra para o RMS da componente superposta). Esta matriz é então enviada para o sistema de mineração de dados.

E. Agrupamento de dados

Após receber o pacote de dados do medidor, é realizado um agrupamento dos dados referentes ao ângulo de corrente e tensão e sua normalização, o mesmo é feito para os valores RMS das componentes superpostas. Esse agrupamento é feito entre os dados atuais e os dados previamente armazenados de faltas anteriores, já tratados pelo medidor.

F. Mineração de dados

Após as grandezas analógicas lidas pelo medidor serem adquiridas, pré-processadas, normalizadas e agrupadas, este arquivo é convertido para o formato de texto e armazenado em um diretório específico. É dado início ao processo de mineração de dados entre o atual arquivo e todos os outros previamente adquiridos. Este processo agrupará o arquivo em um determinado grupo de eventos similares, conhecendo a região típica onde ocorreram os eventos ali agrupados, e determinando a região de ocorrência da nova falta.

Para os testes realizados neste artigo foram comparados dois cenários:

- 1) *Convencional* - não utiliza nenhum tipo de tratamento, apenas a localização em termos de distância da falta, retornada pela técnica de reatância para determinação de distância;
- 2) *Convencional auxiliado por DAMICORE* - neste contexto se faz o uso de mineração de dados, sendo minerados os dados do registro de oscilografia aquisitados pelo sistema de medição presente no bay de entrada da subestação de distribuição. A região definida em clusters entra como auxílio à decisão do método convencional, de modo a reduzir múltiplas estimações.

V. RESULTADOS

A análise dos resultados teve foco principalmente sobre a extensão susceptível ao efeito da múltipla estimação no sistema teste IEEE 34 barras, que é um problema recorrente em localizadores de falta baseados em reatância instalados na subestação alimentadora do circuito. Em um exemplo genérico, admitindo o trecho entre a subestação alimentadora e a primeira ramificação, para qualquer falta que ali ocorra, esse trecho não estaria sujeito ao efeito da múltipla estimação. Isto ocorre, pois existe apenas um ponto no circuito com a distância estimada.

Por outro lado, quando ocorrer uma falta em um ramal lateral, a distância do ponto de falta estimada pelo localizador não especifica se o ponto se encontra em um ramal lateral ou no ramal principal, o que caracteriza múltipla estimação. Esse problema resulta em maior demanda de tempo para a equipe de manutenção localizar a falta e consequentemente maior tempo

para a recomposição do sistema. Aqui o objetivo foi estimar essa extensão susceptível a múltipla estimação no sistema teste IEEE 34 barras, e reduzi-la.

Na Fig. 5 é ilustrado o sistema teste IEEE 34 barras em escala, com a área destacada representando a extensão sujeita a múltipla estimação. A Fig. 5 (a) apresenta a extensão do sistema susceptível a esse erro para faltas AT. A extensão de múltipla estimação obtida com o auxílio do DAMICORE é apresentada na Fig. 5 (b).

O resultado da mineração de dados, retornado em forma de Clusters foi analisado de forma a reduzir a múltipla estimação. Os resultados obtidos com a simulação dos dois cenários propostos são apresentados na Tabela I. Na segunda coluna dessa tabela são apresentadas as extensões da múltipla estimação para cada tipo de falta, que são a soma da extensão (em quilômetros) dos ramais laterais e o ramal principal. Na Fig. 5 (a), por exemplo, a extensão sujeita a múltipla estimação tem 43km de extensão, entre ramos principais e laterais monofásicos (fase A) e trifásicos. Percebe-se que para faltas AT e BT as extensões susceptíveis são muito maiores que nos outros tipos. Isso ocorre devido à topologia do sistema, cuja maioria dos ramais laterais são monofásicos (fases A e B).

A coluna 3 da Tabela 1 apresenta resultados obtidos com o auxílio do DAMICORE, referente à extensão total susceptível à múltipla estimação por tipo de falta. Conforme é possível observar, para os casos de faltas envolvendo a fase A à terra, o método convencional de estimação da distância resulta em múltipla estimação em uma extensão equivalente a mais de 43 km, enquanto que com a técnica de auxílio à decisão aplicada, a extensão de múltipla estimação é reduzida para 3,49km (redução de 91,95%). Para faltas envolvendo a fase B à terra a extensão foi reduzida de 29,99km (com método convencional) para 3,8km (redução de 87,33%). Para faltas envolvendo a fase C à terra a extensão foi reduzida em 27,59% com o auxílio do DAMICORE. Para faltas bifásicas sem envolvimento de terra em geral a redução de área susceptível a múltipla estimação ficou entre 10% e 16,38%. Nos demais tipos de falta não houve redução.

Na Fig. 5 é apresentado o caso mais crítico em termos de múltipla estimação (faltas AT, conforme Tabela I), porém este foi o melhor caso em termos de resultados.

TABELA I. EXTENSÃO SUJEITA A MÚLTIPLA ESTIMAÇÃO.

Tipo de Falta	Convencional (km)	Convencional + DAMICORE (km)
AT	43,232	3,48
BT	29,993	3,80
CT	3,48	2,72
AB	3,48	2,98
BC	3,48	3,12
CA	3,48	2,91
ABT	3,48	3,48
BCT	3,48	3,48
CAT	3,48	3,48
ABC	3,48	3,48
ABCT	3,48	3,48

VI. CONCLUSÕES

A ocorrência de faltas é um dos principais fatores que influenciam na confiabilidade de sistemas de distribuição de energia, cuja topologia (com presença de ramais laterais e distribuição de cargas) dificulta a localização destas faltas com uso de técnicas convencionais, principalmente devido ao efeito da múltipla estimação. Nesse sentido, e agregado a outros fatores, uma evolução para sistemas *Smart Grids* é esperado para um futuro próximo, e é nesse contexto que se aplica este trabalho.

O trabalho apresentou uma metodologia para auxílio à decisão de estimadores de distância de falta convencionais, lançando mão de um pré-processamento de sinais simples associado à técnica mineração de dados DAMICORE. Foi apresentado um cenário com estimação de distância auxiliada pelos métodos propostos e, então, comparados com o desempenho da ferramenta convencional sem auxílio.

Os resultados obtidos evidenciam o potencial que o DAMICORE tem para minerar dados complexos e reconhecer padrões, além de mostrar a potencialidade do algoritmo proposto, principalmente na capacidade de detectar faltas ocorridas em ramais laterais monofásicos, dado que os melhores resultados ocorreram em simulações de faltas monofásicas à terra (situação em que ocorre a maior múltipla estimação no sistema utilizado). Neste Cenário, a redução da múltipla estimação chega a 91,95% para faltas AT.

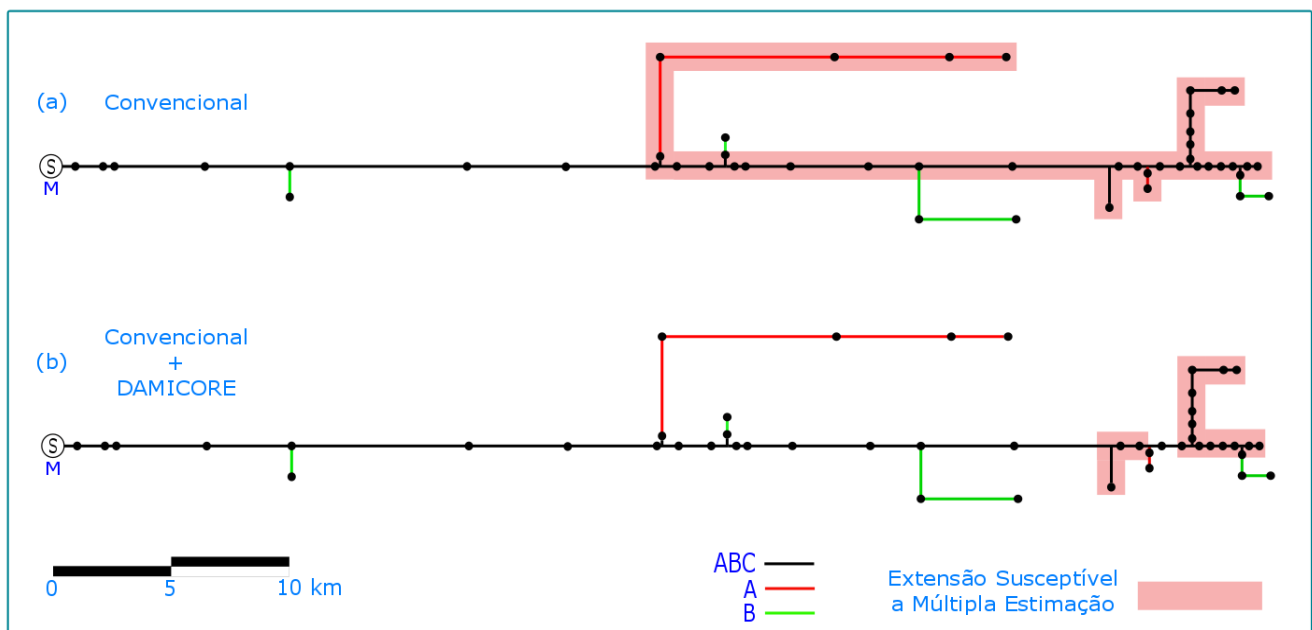


Fig. 5. Múltipla estimação para faltas fase A à terra: (a) Convencional e (b) Convencional auxiliado pelo DAMICORE.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Teng, W. H. Huang, and S. W. Luan, "Automatic and Fast Faulted Line-Section Location Method for Distribution Systems Based on Fault Indicators," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 4, pp. 1653–1662, 2014.
- [2] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*. New York: CRC Press, 2002.
- [3] R. A. Flauzino, "Identification and Location of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems Based on Orthogonal Component Decomposition and Fuzzy Inference," Thesis (Doctorate Degree), Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2007.
- [4] E. C. Senger, G. Manassero, C. Goldemberg, and E. L. Pellini, "Automated fault location system for primary distribution networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 II, pp. 1332–1340, 2005.
- [5] A. Pahwa, "Role of distribution automation in restoration of distribution systems after emergencies," *Transm. Distrib. Conf. Expo. 2001 IEEE/PES*, pp. 1204–1205, 2001.
- [6] R. A. León, V. Vittal, and G. Manimaran, "Application of Sensor Network for Secure Electric Energy Infrastructure," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 2, pp. 1021–1028, 2007.
- [7] I. Colak, S. Sagiroglu, G. Fulli, M. Yesilbudak, and C.-F. Covrig, "A survey on the critical issues in smart grid technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 396–405, 2016.
- [8] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-2, no. 8, pp. 59–60, 1982.
- [9] "What is Smart Grid?" [Online]. Available: <http://www.iec.ch/smartgrid/background/explained.htm>. [Accessed: 26-Jun-2017].
- [10] M. E. El-Hawary, "The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 42, no. 3–4, pp. 239–250, 2014.
- [11] M. M. Selvam, R. Gnanadass, and N. P. Padhy, "Initiatives and technical challenges in smart distribution grid," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 911–917, 2016.
- [12] K. Moslehi, R. Kumar, and S. Member, "A Reliability Perspective of the Smart Grid," vol. 1, no. 1, pp. 57–64, 2010.
- [13] "Estimating the costs and benefits of the smart grid," EPRI. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Rep. 1022519, 2011.
- [14] M. M. Saha, J. Izykowski, and E. Rosolowski, *Fault Location on Power Networks*, 1st ed. Springer-Verlag London, 2010.
- [15] B. A. Silva, L. A. Cuminato, A. C. B. Delbem, P. C. Diniz, and V. Bonato, "A technique to guide heterogeneous multi-core processor design along with an heterogeneity-aware scheduling policy," *IET Comput. Digit. Techniques*, p. 25, 2014.
- [16] E. A. P. Gomes, "Detecção de Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos por Correlações da Mineração Complexa de Dados," Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2016.
- [17] R. Cilibrasi and P. M. B. Vitányi, "Clustering by compression," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1523–1545, 2005.
- [18] N. Saitou and M. Nei, "The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees," *Mol. Biol. Evol.*, vol. 4, no. 4, pp. 406–425, 1987.
- [19] M. E. J. Newman, "Fast algorithm for detecting community structure in networks," *Phys. Rev. E*, vol. 69, no. 6, p. 66133, 2004.
- [20] "Users' Manual ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista." [Online]. Available: <http://www.atpdraw.net/downloads.php>.
- [21] "MATLAB Documentation." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_cid=doc_ftr.
- [22] "34-Bus Test Feeder - Distribution Test Feeder Working Group - IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee." [Online]. Available: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>. [Accessed: 15-Feb-2017].
- [23] M. Lehtonen, S. Pettissalo, and J.-H. Etula, "Calculational Fault Location for Electrical Distribution Networks," in *1991 Third International Conference on Power System Monitoring and Control*, 1991, pp. 38–43.
- [24] D. V. Coury, M. Oleskovicz, and R. Giovanini, *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. Editora da Universidade de São Paulo, 2007.
- [25] G. Morales-España, J. Mora-Flórez, and H. Vargas-Torres, "Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, 2009.