



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC - 23
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO V
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

**SISLOC - NOVA VERSÃO DE SISTEMA LOCALIZADOR DE FALTAS PARA LINHAS E REDES DE
DISTRIBUIÇÃO E SUA APLICAÇÃO A CASOS REAIS E SIMULADOS**

Rodrigo L. Valadão *	Clever Pereira	Edgard P. Cardoso	Heitor M. Veloso	Júlio C. M. Lima
UFMG	UFMG	CEMIG	CEMIG	CEMIG

RESUMO

Neste trabalho é proposta um método totalmente original para a localização de faltas em sistemas de distribuição, utilizando técnicas de otimização, a matriz das impedâncias de barra e dados de corrente e tensão de um terminal. Implementada na atual versão do sistema localizador, denominado SISLOC, leva em consideração as principais características dos sistemas de distribuição tais como heterogeneidade, assimetria e capilaridade. Sua precisão e robustez foram avaliadas tanto em simulações quanto em casos reais de curtos-circuitos em alimentadores de 13.8 kV. Os bons resultados obtidos frente a diversas condições de faltas e incertezas, mostram todo seu potencial e a efetividade.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção Digital, Localização de Faltas, Redes de Distribuição.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sistemas de transmissão e de distribuição tiveram uma rápida expansão, impulsionada pelo crescimento econômico, industrial e tecnológico, resultando num aumento na extensão e no número das linhas em todo o mundo. Estas linhas estão suscetíveis a falhas, geralmente transitórias, que não provocam danos maiores, sendo solucionadas através de religamentos automáticos sucessivos. Eventualmente, estas faltas, de caráter transitório, podem evoluir para faltas permanentes, exigindo o trabalho das equipes de manutenção para reparo ou substituição dos elementos danificados, antes do restabelecimento seguro do fornecimento.

Até então, muita pesquisa tem sido realizada no desenvolvimento de técnicas e algoritmos para a localização de faltas para linhas de transmissão, usando dados de um (1) ou de dois terminais (2). Todavia, estes métodos geralmente não são adequados às redes radiais de distribuição, devido a sua elevada complexidade. Ao longo de um alimentador trifásico típico de distribuição podem normalmente existir vários tipos de cabos, de estruturas, com diversos tipos de geometria, bem como a presença de inúmeros ramais monofásicos, bifásicos e trifásicos.

A maior parte dos métodos propostos para as redes de distribuição é baseada nos fasores fundamentais, estimados a partir de medições realizadas no sistema. Considerando que na maioria dos casos estas medições

estão disponíveis apenas na subestação, é comum que métodos baseados nesta técnica (3-6) forneçam mais de uma solução, já que estas redes também possuem diversas cargas e ramais laterais. Todavia, também é possível encontrar na literatura outros tipos de abordagens para o problema, utilizando, por exemplo, a teoria de ondas viajantes (7). Outros autores se concentram no desenvolvimento de localizadores de falta utilizando sistemas especialistas (8) e técnicas de inteligência artificial (9). Esta última propõe um sistema localizador, integrado ao sistema de gerenciamento da distribuição, utilizando a lógica *Fuzzy*.

Este artigo apresenta as bases teóricas de uma abordagem totalmente nova e original para a estimativa de locais de falta em redes radiais de distribuição, fazendo uso também das componentes fundamentais de tensão e corrente, estimadas a partir dos dados adquiridos na subestação, seja por oscilógrafo digital, seja pela função de oscilografia digital já presente em diversos relés de proteção digitais de alimentadores de distribuição. A técnica baseia-se na matriz das impedâncias de barra que, construída diretamente no domínio das fases (10) com um mínimo de simplificações, possibilita a identificação de possíveis locais de falta em redes assimétricas, considerando sua heterogeneidade e capilaridade, empregando técnicas de otimização. Trabalhos anteriores (11,12) apresentaram os resultados iniciais obtidos no desenvolvimento de um sistema computacional destinado à tarefa de localização de faltas em redes de distribuição, denominado SISLOC. No presente trabalho também são apresentados os resultados alcançados pela atual versão do localizador, através de sua aplicação, tanto para casos de teste simulados quanto para dados provenientes de ocorrências reais, mostrando a validade e efetividade do sistema concebido.

2.0 - APRESENTAÇÃO DO MÉTODO

2.1 Princípios fundamentais

O princípio fundamental utilizado na abordagem proposta é essencialmente o mesmo utilizado por (9), apesar de tratar-se de técnicas distintas. Este princípio consiste na procura pela similaridade entre os valores medidos e calculados para a corrente trifásica pós-falta na subestação. Entretanto, no trabalho citado o efeito da resistência de falta não é considerado, fato que freqüentemente implicará num sobre-alcance da solução. Além disso, esta aproximação geralmente requer um grande número de informações adicionais provenientes de fontes externas como de sensores de tensão, situação de chaves e disjuntores, provenientes do sistema SCADA, etc., que nem sempre estão disponíveis. A idéia básica da metodologia proposta consiste em considerar o efeito da resistência de falta, aperfeiçoando o processo de estimação.

Em sistemas elétricos de potência é possível avaliar correntes e tensões, sob condições de falta, usando o teorema de Thévenin. A matriz das impedâncias de barra proporciona uma maneira eficiente de realizar estes cálculos, realizando poucas operações aritméticas envolvendo algumas de suas linhas e colunas (10).

A apresentação do método será realizada utilizando-se o sistema de distribuição radial mostrado na Figura 1. Proposto por R. K. Aggarwal (4) para a avaliação de seu trabalho, admite também a possibilidade da presença de unidades de co-geração paralelamente à rede. Contudo neste trabalho essa possibilidade não será considerada. Espera-se que, em breve, a abordagem seja estendida a estes casos.

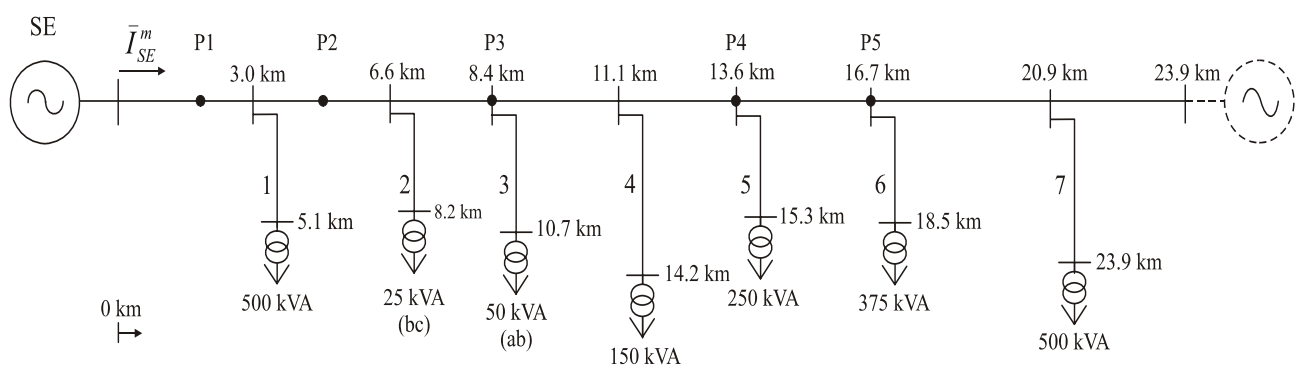


FIGURA 1 – Rede radial de distribuição utilizado nas simulações e na apresentação do método

2.2 Localização de faltas no tronco principal do alimentador

2.2.1 Sem o efeito da resistência de falta

Ao longo do tronco principal do alimentador da Figura 1, cuja extensão é de 23,9 km, podem ser observados cinco pontos situados, respectivamente, a 1,8 km, 4,8 km, 8,4 km, 13,6 km e 16,7 km da subestação. Cada um destes pontos servirá para a realização dos testes de curto-circuito. Inicialmente, será considerado em P4 um curto-

circuito monofásico, envolvendo a fase “a”, sem a presença de resistência de falta. A partir das medições realizadas na barra de saída da subestação, o vetor dos fasores de 60 Hz, referente às correntes pós-falta “medidas” neste alimentador, pode ser dado por:

$$\bar{I}_{SE}^m = \left[I_{SE(a)}^m \quad I_{SE(b)}^m \quad I_{SE(c)}^m \right]^T \quad (1)$$

O procedimento para a pesquisa do provável local do defeito é ilustrado na Figura 2, onde β e R_F correspondem, respectivamente, aos valores assumidos para o local e à resistência de falta. Em cada teste de curto-circuito efetuado no sistema com o auxílio da matriz das impedâncias de barra, a corrente total pós-falta “calculada” será

$$\bar{I}_{SE}^c = \left[I_{SE(a)}^c \quad I_{SE(b)}^c \quad I_{SE(c)}^c \right]^T \quad (2)$$

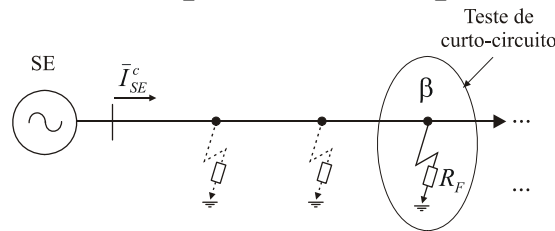


FIGURA 2 – Cálculo da corrente de curto-circuito vista na subestação para uma dada condição de falta

Variando sistematicamente β por todo trecho, será possível deduzir o provável local da falta através da comparação da corrente calculada (Equação 2) com os valores medidos em cada fase medida na subestação (Equação 1), uma vez que estas quantidades idealmente possuirão o mesmo valor, quando o ponto assumido de falta coincidir com o local exato da ocorrência. Deste modo, é necessário ainda que se disponha de uma função, $F_c(x)$, que quantifique o grau de similaridade entre estas quantidades. Onde

$$x = \left[\beta \quad R_F \right]^T \quad (3)$$

Assim, considerando o conjunto de pontos avaliados, é possível traçar uma curva de erro como a mostrada na Figura 3. A análise deste gráfico revela que o local da falta pode ser estimado pelo ponto de mínimo da função de comparação $F_c(x)$.

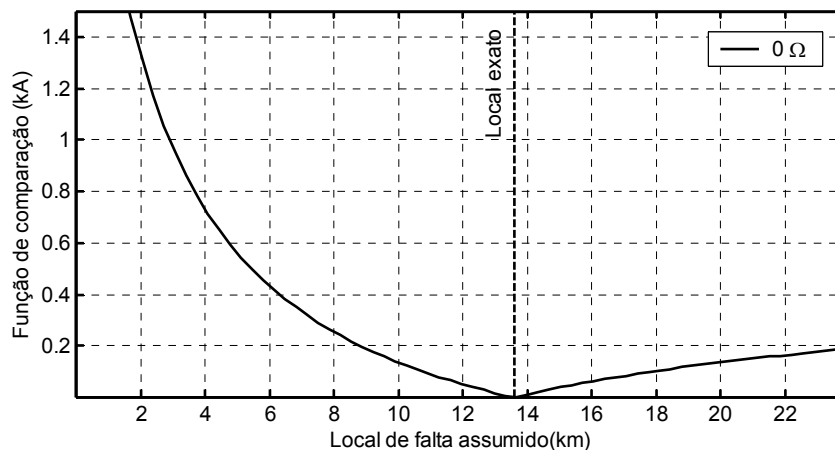


FIGURA 3 – Curva de erro para a estimação do local de falta no tronco principal de um alimentador radial

2.2.2 Considerando o efeito da resistência de falta

O procedimento para esta situação pode ser demonstrado, considerando o mesmo caso de curto-circuito do item anterior, só que desta vez para uma resistência de falta de 5Ω . Os mesmos testes de curto-circuito apresentados na Figura 2 serão realizados ao longo de todo o tronco do alimentador, só que desta vez para diversos valores assumidos de resistência de falta, cada qual escolhido dentro de uma faixa pré-determinada. Assim, obtêm-se um conjunto de curvas de nível, como as mostradas na Figura 4 para valores assumidos de resistências de falta de 0Ω , 5Ω e 10Ω .

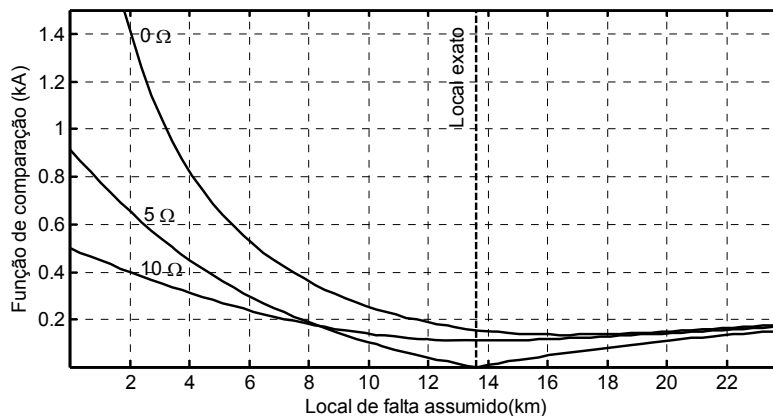


FIGURA 4 – Determinação de locais de falta considerado o efeito da resistência de falta

O resultado mostra que, semelhantemente ao apresentado no item anterior, a estimativa para o local do defeito pode ser obtida através da busca pelo ponto de mínimo de $F_c(x)$. Esta procura pelo ponto de mínimo erro pode ser realizada de diferentes maneiras. A primeira delas através do levantamento direto de diversas curvas de nível, variando sistematicamente os valores de β e R_F . Neste caso, a precisão e o esforço computacional estarão diretamente relacionados ao valor da resolução escolhida para a pesquisa. Uma segunda opção se encontra no emprego de algoritmos de busca utilizados nos problemas de otimização como, por exemplo, o Elipsoidal, o BFGS ou o Método de Newton.

2.3 Localização de faltas em ramos laterais

Através da pesquisa dos prováveis locais de falta nas várias ramificações no sistema da Figura 1, também se obtém um conjunto de curvas de erro, para cada um destes caminhos alternativos. Exemplificando este procedimento, são apresentadas na Figura 5 as curvas de erro para os ramos 1 e 4 da rede da Figura 1, respectivamente.

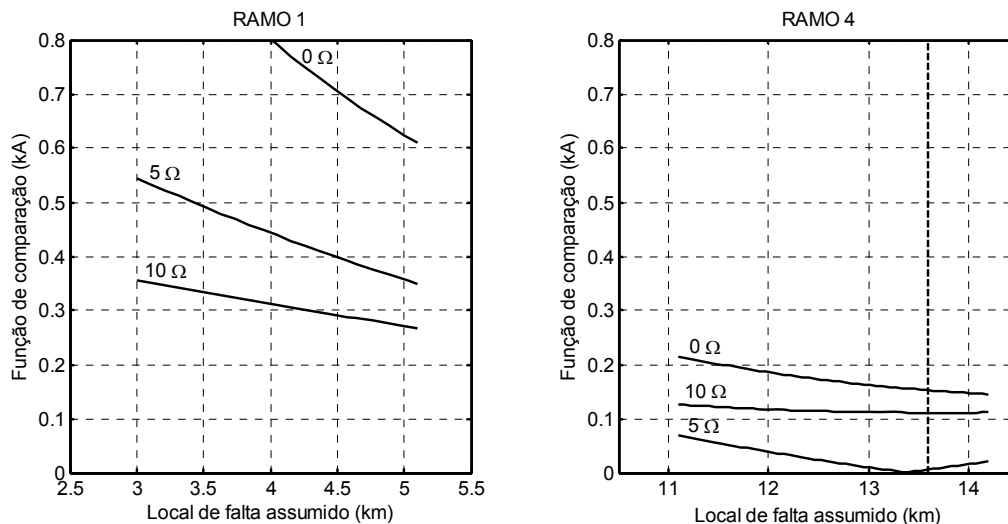


FIGURA 5 – Pesquisa de locais de falta nos ramos laterais 1 e 4

Conforme já mencionado, a configuração radial faz com que múltiplos locais do sistema possuam a mesma “distância elétrica” até a subestação e, por esta razão, mais de uma solução pode ser obtida. Esta característica também é mostrada na Figura 5. Todavia, esta solução não necessariamente terá o mesmo valor da distância de falta obtida para o teste anterior, mostrada na Figura 4, uma vez que as linhas laterais são constituídas de cabos de bitola diferente.

Além disso, as curvas obtidas na pesquisa realizada no ramo 1 da Figura 5 não apresentam um mínimo próximo de zero, se comparada à curva do ramo 4, caracterizando que nesta ramificação não há um ponto ou região com grandes probabilidades de ser eleito como possível solução.

2.4 Determinação da função de comparação

A função $F_c(x)$, que quantifica o grau de semelhança entre os valores de corrente pós-falta calculados e simulados, é dada por

$$F_c(x) = \sum_{i=a,b,c} \theta_i \left\{ I_{SE(i)}^m - I_{SE(i)}^c \right\} \quad (4)$$

Onde θ_i é uma constante binária que assume o valor unitário, caso a fase i esteja envolvida no defeito, ou nulo, em caso contrário.

2.5 Classificação das possíveis soluções

Conforme mostrado nos itens antecedentes, a pesquisa sistemática por locais de falta ao longo de todo o sistema de distribuição da Figura 1 poderá indicar múltiplas soluções e, conseqüentemente, diversas alternativas para o envio das equipes de manutenção. Do ponto de vista operacional, é mais interessante a definição de regiões de busca, determinadas de acordo com um critério de precisão.

Deste modo, o ponto de mínimo global $F_c(x^*)$ é eleito o local com a maior probabilidade de ser o verdadeiro local do defeito. A partir daí, os demais pontos do sistema são ordenados decrescentemente, conforme o valor do erro dado pela curva de nível calculada para R_F^* .

3.0 - TESTES

3.1 Avaliação do desempenho em casos simulados

O desempenho da metodologia proposta foi avaliado no mesmo sistema radial apresentado na Figura 1, utilizando simulações de circuitos-circuitos realizadas no programa *Alternative Transients Program* (ATP). Maiores detalhes sobre a configuração das linhas, como também sobre os parâmetros das cargas e fontes podem ser obtidos em (5). As linhas do tronco do alimentador e suas derivações foram modeladas usando parâmetros distribuídos e condutores de alumínio simples 336.4 MCM e 2 AWG, respectivamente. A cada carga, cujos valores nominais de potência são apresentados na Figura 1, foram atribuídos percentuais de carregamento de 50%, 40%, 25%, 60%, 75%, 75% e 50%, respectivamente. Os testes realizados tiveram como objetivo avaliar o desempenho e a robustez da metodologia com relação a parâmetros como: o tipo do defeito, o local do curto-circuito, o valor da resistência de falta, a incerteza na representação das cargas e na determinação do equivalente da subestação. Para o cálculo dos fasores fundamentais optou-se pela utilização do algoritmo de erros mínimos quadrados (13).

Todos os resultados de localização apresentados serão apresentação de acordo com o valor do erro percentual, calculado em relação ao comprimento de 23,9 km do tronco principal do alimentador, baseado no seguinte equacionamento:

$$E(\%) = \left(\frac{D^{calc} - D^{exato}}{D^{total}} \right) 100\% \quad (5)$$

A pesquisa pelo ponto de mínimo global de $F_c(x)$ foi realizada somente do tronco deste alimentador utilizando o algoritmo elipsoidal de busca.

3.1.1 Influência do local, do tipo e do valor da resistência de falta

A influência destes parâmetros foi avaliada tanto para o caso de faltas monofásicas envolvendo a fase "a" (AT), quanto para faltas bifásicas entre fases "b" e "c" (BC). Em ambos os casos, foram realizadas simulações nos pontos P1, P2, P3, P4 e P5 da Figura 1, para valores de resistência de falta de 2 Ω , 5 Ω , 10 Ω e 25 Ω . Inicialmente, foram considerados os valores exatos das cargas e do equivalente da subestação. Os resultados obtidos são apresentados nos gráficos da Figura 6. A Tabela 1 apresenta os valores estimados para a resistência de falta.

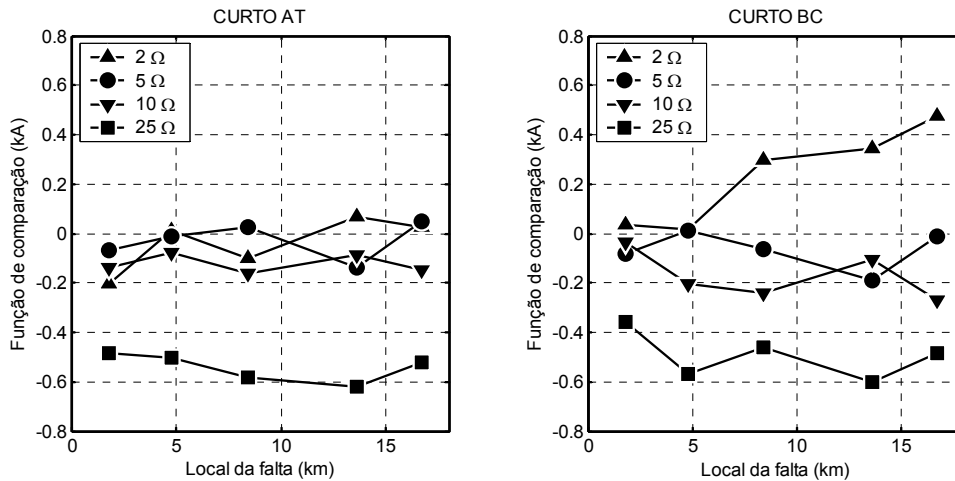


FIGURA 6 – Resultados obtidos para faltas AT e BC para valores de cargas conhecidos

Nestes resultados, podem ser observadas algumas características comuns à maioria dos métodos de localização. Em geral, o erro percentual da localização sofre uma ligeira elevação devido ao aumento da resistência e da distância de falta. Foram obtidos, em termos absolutos, para os curtos AT e BC, erros médios de 47.8 metros (0.20%) e 57.4 metros (0.24%), respectivamente. Enquanto que o erro máximo absoluto obtido foi de aproximadamente 0.60%, ou seja 143.4 metros, para uma resistência de 25 Ω .

TABELA 1 – Valores estimados de resistência de falta

Valor exato (Ω)	P1 (1.8 km)	P2 (4.8 km)	P3 (8.4 km)	P4 (13.6 km)	P5 (16.7 km)
2.0	2.005	1.988	2.015	1.984	1.978
5.0	5.001	5.005	5.021	5.020	5.043
10.0	10.005	10.015	10.016	10.028	10.033
25.0	25.032	25.043	25.052	25.090	25.106

3.1.2 Influência da incerteza na representação das cargas

Os gráficos apresentados na Figura 7 apresentam os erros obtidos nos casos de localização de falta simulados considerando-se a incerteza na representação das cargas. As curvas mostram os erros obtidos apenas para a falta monofásica, uma vez que para o segundo caso os resultados foram similares. Esta avaliação é importante para verificar a robustez do método, devido à dificuldade de se determinar na prática este valor, uma vez que estas cargas possuem uma característica dinâmica. Por esta razão, foi considerada uma diferença de 25% entre os valores reais das impedâncias de carga e as utilizadas para a construção da matriz de impedâncias.

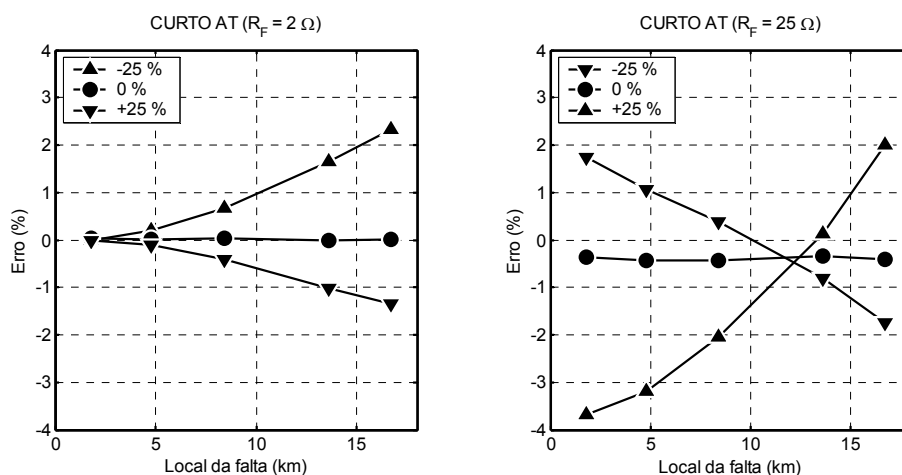


FIGURA 7 – Resultados obtidos para um curto AT considerando a incerteza na determinação do valor da carga

Os resultados obtidos mostram uma elevação nos erros de localização devido ao erro de estimação da carga. Todavia, o algoritmo ainda se mostrou robusto, mesmo nestas condições, apresentando um erro absoluto máximo de 556.8 metros (2.33%) para resistência de falta de 2.0 Ω , enquanto que, para o caso de resistência elevada, esse valor foi de 881.9 metros (3.69%).

3.1.3 Influência da incerteza na determinação do equivalente da subestação

Outro aspecto importante a ser verificado é a influência da incerteza na determinação do equivalente de curto-circuito da subestação. Assim, os mesmos casos anteriores foram avaliados também considerando erros absolutos em módulo e fase de, respectivamente, 25% e 15 graus. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos considerando uma resistência de falta de 25 Ω , considerando a incerteza com relação ao módulo. Para o caso da variação no ângulo, todos os erros foram inferiores a 2.0%, em módulo.

As curvas da Figura 8 mostram que, para o caso de falta BC, o método foi mais sensível às variações no módulo, apresentando um erro máximo de 5.81% ou 1.39 km. Contudo, é possível obter uma boa estimativa para este parâmetro utilizando a formulação apresentada por Heinville (14).

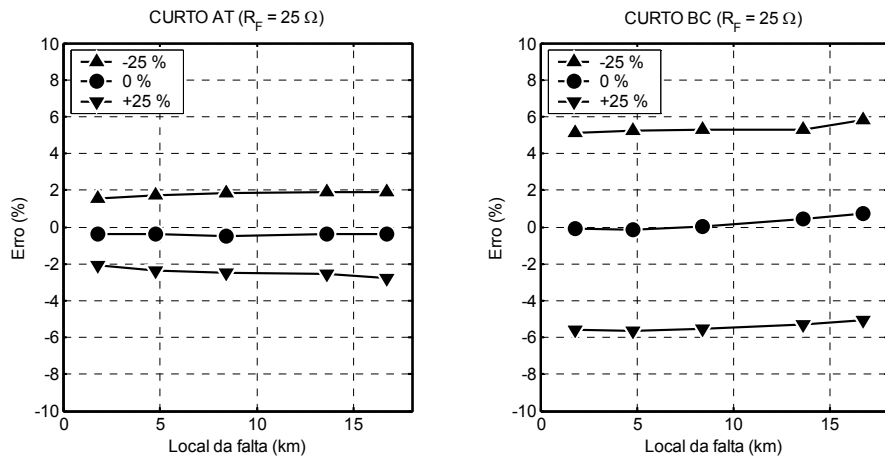


FIGURA 8 – Resultados obtidos considerando a incerteza na determinação do equivalente da fonte

3.2 Testes em casos reais

Na prática, vários fenômenos acontecem simultaneamente durante a dinâmica de uma falta real e são difíceis de serem modelados e nos programas para a simulação de transitórios eletromagnéticos. Podem existir ainda outros fatores de natureza prática que tornam a localização de faltas em redes de distribuição tarefa ainda mais complexa tais como, por exemplo, a falta de atualização dos bancos de dados da companhia concessionária. Por estas e outras razões, torna-se importante verificar o desempenho do método frente a casos reais de falhas, antes de colocá-lo em operação na companhia.

Assim, o SISLOC e a metodologia proposta foram submetidos a diversos casos práticos de localização, ocorridos em alimentadores da CEMIG. Neste trabalho é apresentada sua aplicação para um caso de um curto-circuito evolutivo CT para BCT, provocado pelo rompimento de um cabo. Inicialmente, o curto CT de curto-circuito, mostrado na Fig. 7. As correntes nas fases B e C, registradas pelo relé digital 7SJ632 da SIEMENS® instalado nesta subestação de 13.8 kV, com função de oscilografia digital, podem ser visualizadas nos gráficos da Figura 9.

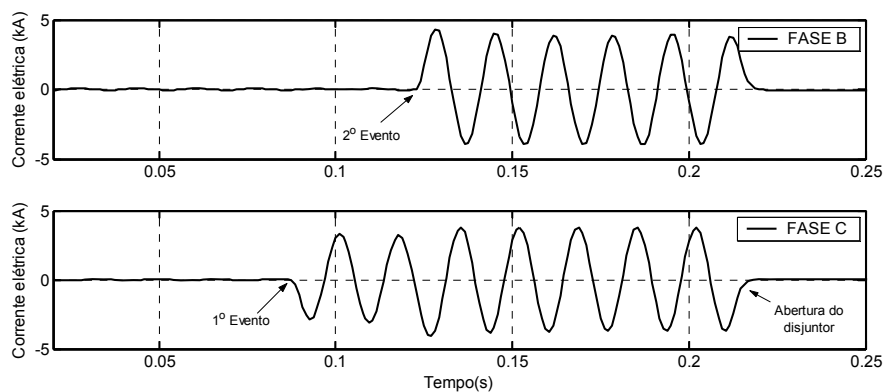


FIGURA 9 – Correntes registradas nas fases B e C durante um curto-circuito real

A composição da rede é apresentada na Tabela 2. Os dados mostram sua heterogeneidade, já que é constituído por três tipos diferentes de estruturas e oito diferentes bitolas de cabos, com uma faixa total de utilização de 11,53 km. A rede ainda é assimétrica, possuindo 477 metros de linhas monofásicas e 192 metros de linhas bifásicas.

TABELA 2 – Composição do alimentador

Rede	Comp. (km)	Bitolas	(%)
Aérea	8.92	4	77.42
Protegida	2.53	2	21.93
Isolada	0.08	1	0.65
Total	11.53	8	100.00

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos pela técnica proposta, comparados ao verdadeiro local da ocorrência, determinado pela equipe de manutenção. Para uma região definida por 2.0% do total de pontos de teste analisados, foram eleitas três barras como os prováveis locais de falta, situando-se em média a aproximadamente 240 metros do verdadeiro local. Neste caso, o valor da resistência de falta estimada foi 0.01 Ω , caracterizando uma falta praticamente sem resistência de arco.

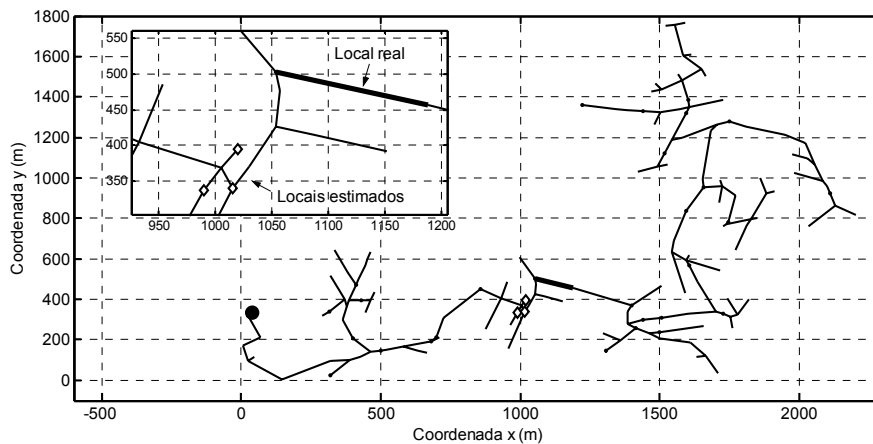


FIGURA 10 – Resultados obtidos na localização de um caso real de falta

4.0 - CONCLUSÃO

Apesar dos avanços nas pesquisas de algoritmos destinados à localização de faltas nos sistemas elétricos de potência, até recentemente, poucos métodos foram propostos para as linhas radiais de distribuição, devido, em grande parte, a sua maior complexidade.

Neste trabalho foi apresentado um método totalmente original para a identificação de locais de faltas em redes radiais de distribuição. Baseado em técnicas de otimização e na matriz das impedâncias de barra, a técnica proposta mostrou-se capaz de realizar tal tarefa, através da busca pela similaridade entre os valores de corrente pós-falta medidos e calculados na barra de saída da subestação. Pelo fato de utilizar informações provenientes de um ponto apenas do sistema, ou seja, da subestação distribuidora, o método pode fornecer múltiplas soluções.

Para a avaliação de desempenho, a técnica foi submetida a diversas condições de falta, a partir de dados provenientes de simulações. Os resultados satisfatórios obtidos, mesmo considerando o efeito da resistência de falta e a incerteza de diversos parâmetros, mostram sua robustez e precisão.

O método também foi submetido a casos práticos de localização de falta em alimentadores reais. Os bons resultados obtidos nestas condições mostram todo o potencial e efetividade do método e, por esta razão, demonstram que esta abordagem pode ser útil para a redução do tempo médio das interrupções.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TAKAGI, T., YAMAKOSHI, Y., YAMAURA, M., KONDOW, R., MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-101, no. 8, August 1982, pp. 2892-2898.
- (2) JOHNS, A. T., JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines, IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, PAS-137, no. 6, 1990, pp. 395-402.
- (3) GIRGIS, A. A., FALLON, C. M., LUBKEMAN, D. L. A fault location technique for rural distribution feeders. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, no. 6, 1170-1175, November/December, 1993.
- (4) AGGARWAL, R. K., ASLAN, Y., JOHNS, A. T. New concept in the fault location for overhead distribution systems using superimposed components. Proceedings IEE. Vol. 144, no. 3, 309-316, May, 1997.