



**GRUPO V
GRUPO DE ESTUDOS DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E COMUNICAÇÃO**

**LOCALIZAÇÃO PRECISA DE FALHAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO SEM USO
DA SEQUÊNCIA ZERO**

**Hélio Antonio da Silva
UFJF**

**Jacques Szczupak ★
ENGENHO/PUC-RJ**

RESUMO

Este trabalho apresenta um novo tipo de localizador de falhas, baseado em tecnologia digital. O localizador não apresenta em seus algoritmos quaisquer dependências aos parâmetros de sequência zero da rede sob observação. Como tal, seu desempenho independe de características físicas do local, tal como da resistividade do solo. O algoritmo não se restringe à localização em linhas radiais, podendo ser aplicado a topologias mais complexas, inclusive linhas com derivações. Testes demonstram sua robustez e versatilidade em relação aos métodos atualmente utilizados.

PALAVRAS-CHAVE

Localizador, falta, linha de transmissão, sequência positiva

1.0 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Tanto a localização de falhas, quanto os próprios relés de proteção em distância, têm tradicionalmente apresentado diversas semelhanças em seu desenvolvimento. De uma forma quase que geral, estes dispositivos possuem forte dependência aos parâmetros de sequência zero da rede sob observação. Estes, por sua vez, dependem, por exemplo, da resistividade do solo e portanto fortemente de condições características do local.

Há diversas descrições de dispositivos deste tipo com desempenho bastante aceitável, mas há também relatórios recentes, ELETRONORTE [1], onde localizadores bem conhecidos no setor, operando pelo método de Takagi [2,3,4] apresentaram erros acentuados na análise dos dados.

Uma comparação destes resultados com os de testes, usando o mesmo localizador, mas agora nos arredores de Tóquio, indica erros bastante mais reduzidos. Esta aparente contradição é na realidade indicadora da dependência dos parâmetros de sequência zero, comum aos métodos atuais e em particular ao de Takagi. Os parâmetros de sequência zero dependem fortemente de grandezas locais, como da resistividade do solo. O mesmo método que funciona no Japão, onde tudo é minuciosamente analisado e conhecido (e até mesmo mais bem comportado), deixa a desejar em uma região típica do Brasil, de difícil acesso, quanto mais conhecimento.

Uma outra característica comum aos localizadores atualmente disponíveis é sua inerente restrição a linhas de transmissão do tipo radial, não operando em outras situações.

O trabalho aqui apresentado desenvolve um novo tipo de localizador de falhas, baseado em tecnologia digital. O localizador não apresenta em seus algoritmos quaisquer dependências aos parâmetros de sequência zero da rede sob observação. Como tal, seu desempenho independe de características físicas do local, tal como da resistividade do solo. A aplicação do método, às mesmas situações apresentadas no relatório Eletronorte, levaram a resultados bastante precisos, mesmo quando foram consideradas eventuais resistências de falha elevadas.

O método proposto permite sua aplicação ao caso usual de linhas do tipo radial. Entretanto, ele também se aplica a sistemas complexos, como a linhas com terminais ligados a sistema fortemente conexo. Além disto, a localização pode ser efetuada também em situações mais complexas, como no caso de linhas com

derivações (taps), observadas a partir de uma barra terminal, ou mesmo das duas barras terminais. Em todas as situações o método foi capaz de localizar as falhas com precisão, mesmo quando esta ocorreu entre derivações da linha, longe do ponto de medição.

2.0 EQUIVALENTE VISTO DE DUAS BARRAS DO SISTEMA ELÉTRICO

O circuito equivalente de um sistema elétrico, visto de duas de suas barras conectadas por uma linha de transmissão, pode ser bastante simples. Esta situação ocorre quando a linha em questão é o único caminho elétrico entre os subsistemas elétricos associados a cada uma destas barras. Nesta situação a linha é dita radial e corresponde ao caso padrão de localização de falhas, segundo os métodos atuais. O circuito equivalente visto por cada barra reduz-se ao equivalente Thevenin, como apresentado na Figura 1.

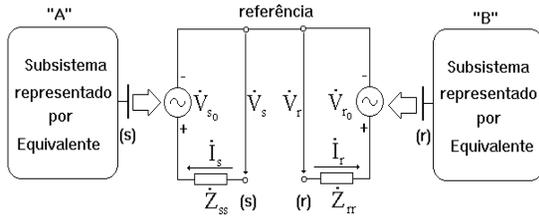


FIGURA 1 - SUBSISTEMAS RADIAIS REPRESENTADOS POR CIRCUITOS EQUIVALENTES THEVENIN

No caso geral, os subsistemas elétricos possuem ligações externas à linha em questão, de tal forma que perturbações junto a uma das duas barras propagam-se externamente à linha até a outra barra. Com isto o equivalente toma sua forma mais geral, indicada na Figura 2, onde \dot{Z}_{ss} e \dot{Z}_{rr} são as impedâncias de Thevenin ou impedâncias vistas respectivamente das barras “s” e “r”, a impedância \dot{Z}_{sr} é a impedância de transferência de uma barra a outra. As tensões, \dot{V}_{s_0} e \dot{V}_{r_0} são as tensões em vazio ou de Thevenin nessas barras, correspondentemente.

O trabalho aqui apresentado considera o sistema elétrico em sua forma mais geral, representando-o pelo equivalente descrito.

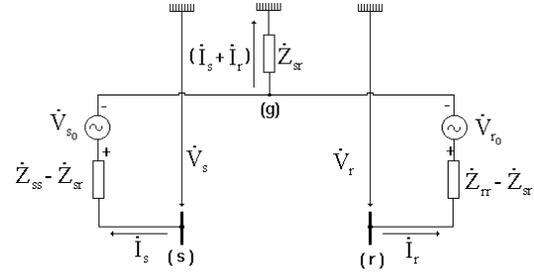


FIGURA 2 - CIRCUITO EQUIVALENTE NO CASO GERAL

O Novo Algoritmo parte do conhecimento do circuito equivalente de seqüência positiva do sistema elétrico conectado às barras terminais. Devem também ser conhecidas as impedâncias longitudinal e entre linha e terra (ambas por unidade de comprimento) da linha a ser monitorada. Todo seu desenvolvimento utiliza somente o circuito equivalente de seqüência positiva da rede em falta, permitindo a localização de qualquer tipo de falta, não importando se esta seja fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou mesmo trifásica.

Por fazer uso das impedâncias equivalentes terminais, o método não emprega a simplificação que considera o fator de distribuição de corrente de falta como um real puro, bastante comum a outros algoritmos [5], [6].

3.0 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS COM DERIVAÇÕES

Considere para ilustrar o uso do localizador a configuração mostrada na Figura 3. Escolheu-se essa rede, apesar de bastante particular, por ser muito encontrada no sistema elétrico brasileiro e na América Latina em geral. Nela, a linha de transmissão possui diversas subestações em derivação, conectadas ao longo de sua extensão. O sistema CESP, por sua complexidade foi utilizado como base, realçando a aplicabilidade do localizador em situações reais. Neste tipo de sistema, o aparecimento de subestações em derivação, faz com que valores diferentes de corrente de carga passem pelos diversos trechos da linha, dificultando a localização de eventuais faltas.

A linha a ser monitorada é a de 138 kV, Porto Ferreira - Rio Claro I, com 75,8 km de extensão. Ainda na Fig.3 pode-se ver um localizador de falta hipotético, instalado na subestação Porto Ferreira, saída para Rio Claro I, onde se supõe instalado o Novo Algoritmo. Por se tratar de linha de transmissão relativamente curta, sua admitância paralela foi desprezada na aplicação do algoritmo.

Os valores das impedâncias de seqüência positiva e zero dessa linha foram extraídos do programa de cálculo de parâmetros de linha da Companhia Energética de São Paulo – CESP.

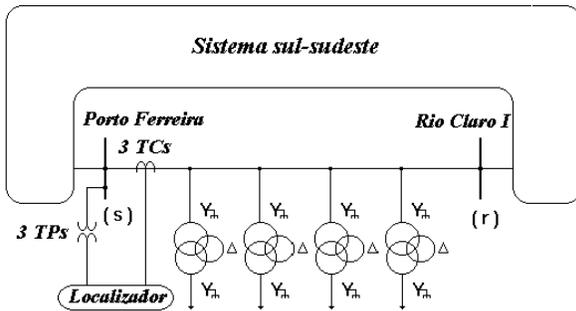


FIGURA 3 – LINHA COM DERIVAÇÕES

Conhecidas as impedâncias equivalentes terminais, o próximo passo é a realização de simulações de faltas no sistema em estudo. Nesse caso simularam-se seis faltas monofásicas no sistema da Figura 3; “f₁” a 7 km, “f₂” a 19 km, “f₃” a 27 km, f₄ a 36 km, f₅ a 58 km e “f₆” a 75,8 km da subestação Porto Ferreira (barra “s”). Foi utilizado para simulação o programa de cálculo de curto-circuito da “COPEL [8]”. Em todos pontos de falta citados, consideraram-se resistências de arco variando entre 0, 20 e 50 Ω .

O algoritmo de Takagi [2,3,4] foi escolhido para fins de comparação com o Novo Algoritmo. Deve-se entretanto tomar em consideração nesta comparação que o algoritmo de Takagi, assim como os demais, não foi desenvolvido para atuar dentro desta topologia de rede. Entretanto, este experimento reproduz uma situação real, em que este tipo de algoritmo, por ser o único disponível, é empregado fora de sua especificação. De resto, o algoritmo de Takagi é atualmente um dos mais conceituados para a localização de faltas em linhas radiais.

A Fig.4 ilustra graficamente a coincidência de resultados corretos pelo Novo Algoritmo, mostrando-o insensível às variações da resistência de arco. No caso do algoritmo de Takagi os erros em valores absolutos na localização da falta aumentaram significativamente na medida em que a resistência de arco do defeito diminuiu. Esta ampliação do erro, para faltas após o ponto f₃, é justificada pelo crescimento da corrente de defeito de seqüência zero, injetada pelas derivações.

O gráfico na Figura 5 compara os erros relativos encontrados na localização das faltas ora utilizando o algoritmo de Takagi ora utilizando o Novo Algoritmo.

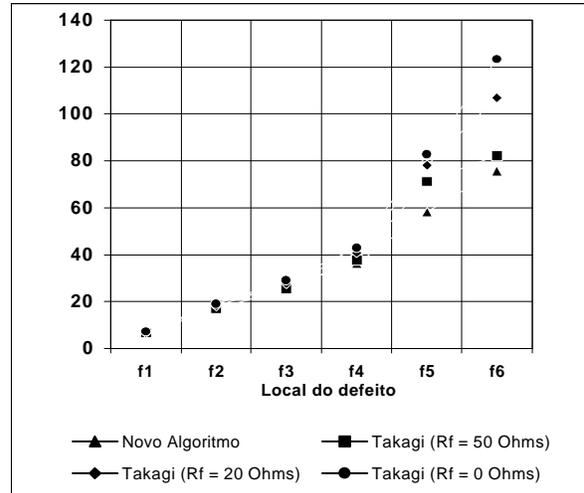


FIGURA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE ERROS (KM) DO NOVO ALGORITMO E O DE TAKAGI

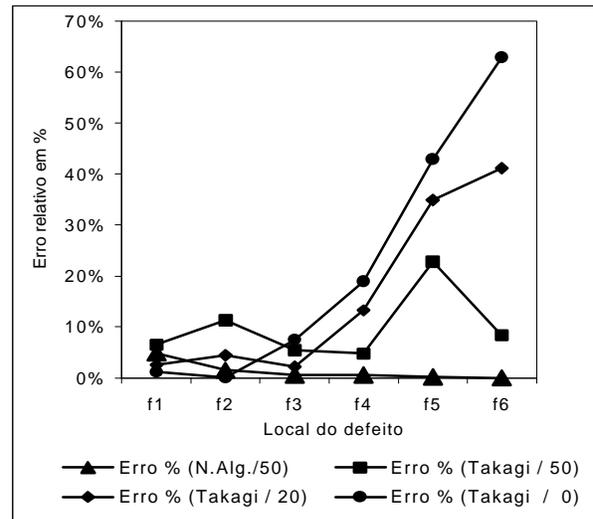


FIGURA 5 – COMPARAÇÃO ENTRE ERROS RELATIVOS DO NOVO ALGORITMO E DO ALGORITMO DE TAKAGI.

Desta última figura, pode-se concluir que o erro na localização da falta indicado pelo Novo Algoritmo tende a zero para faltas no fim da linha. Mesmo para faltas no início da linha o erro relativo é muito pequeno. Já o erro na localização da falta indicado pelo algoritmo de Takagi é extremamente elevado para faltas ao fim da linha. Caso se considere que este algoritmo utiliza o modelo de seqüência zero com eventuais incertezas nas impedâncias de seqüência zero e mútuas da linha, o erro final deverá ser ainda maior que o apresentado. Esta comparação ilustra a enorme vantagem do Novo Algoritmo quando da localização de faltas à terra em linhas de transmissão com subestações em derivação conectadas ao longo de sua extensão.

Sensibilidade às Impedâncias Terminais

Como o Novo Algoritmo utiliza as impedâncias equivalentes terminais da linha a ser monitorada, este pode ser um ponto fraco, que merece ser explorado. Para isto utiliza-se a análise de sensibilidade com respeito a alterações nestas impedâncias, por exemplo devido a contingências no sistema elétrico. As figuras 6 a 8 ilustram os resultados encontrados para a localização das faltas com diversas resistências de arco e número variável de contingências no sistema CESP. Note-se que as contingências foram criadas no entorno das barras e não em pontos remotos do sistema.

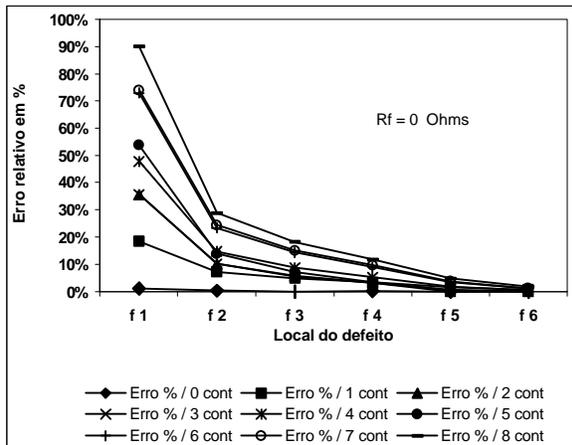


FIG.6- LOCALIZAÇÃO X CONTINGÊNCIAS. RESISTÊNCIA DE ARCO 0 Ω

Observando as figuras anteriores, pode-se ver que, devido às contingências, o erro relativo na indicação do local da falta aumenta na medida em que aumenta o número de contingências. Quanto mais próximo do terminal localizador estiver a falta, maior será o erro relativo na distância localizada. Este erro é tanto maior (ver Figura 6) quanto maior for a corrente de falta, o que ocorre para resistência de arco zero. Isto é uma característica inerente ao Novo Algoritmo.

No entanto, para as faltas posteriores a um quarto do comprimento da linha (ponto f_2), o erro cai abruptamente para cerca de 35% nas três condições de resistência de arco simuladas. Do ponto de falta f_4 à frente, o erro relativo sempre é menor que 5%. No caso de ausência de contingência, a trajetória do erro relativo continua descrevendo uma curva inversa, errando mais no início da linha, porém, com erro relativo nos primeiros quilômetros muito pequeno, menor que 5%.

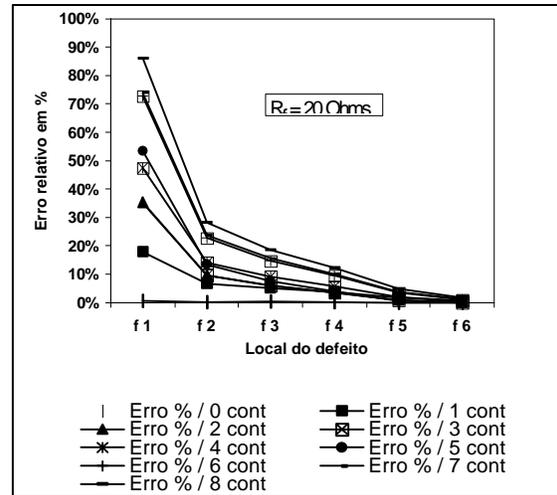


FIG 7- LOCALIZAÇÃO X CONTINGÊNCIAS. RESISTÊNCIA DE ARCO 20 Ω

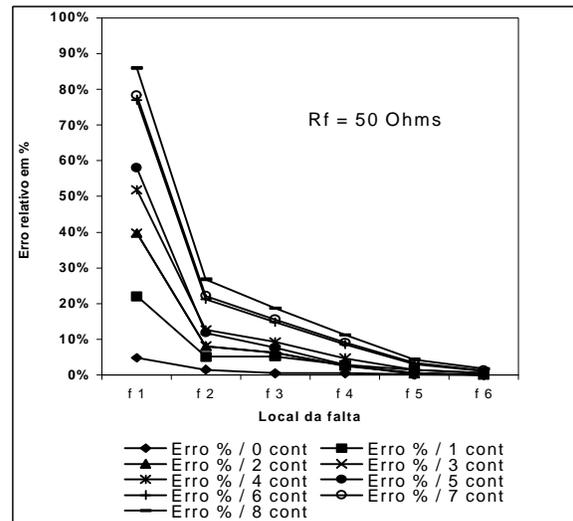


FIG 8 - LOCALIZAÇÃO X CONTINGÊNCIAS. RESISTÊNCIA DE ARCO 50 Ω

Para melhor comparar os dois métodos, “Novo Algoritmo” e Takagi, traçam-se, em um mesmo gráfico na Figura 9, as curvas de erro relativo representativas destes métodos para uma mesma resistência de arco. Escolheu-se para isto, aleatoriamente, a resistência de arco de 20 Ω . No caso do método de Takagi, foi considerada a possibilidade de haver um erro na impedância de seqüência zero em mais 10% ou 20%.

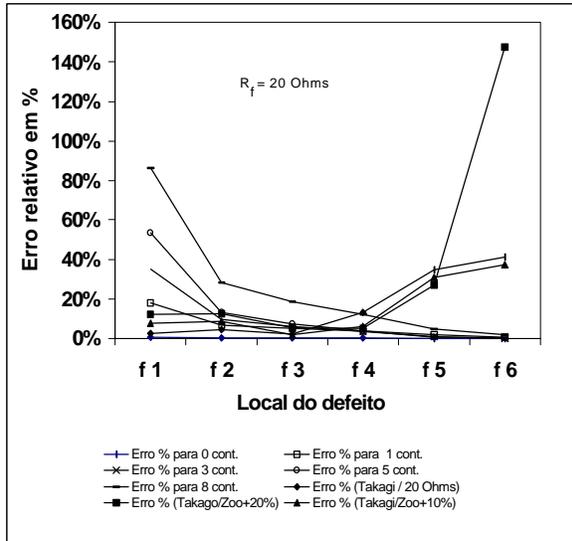


FIGURA 9 - ERROS RELATIVOS

O gráfico na Figura 9 ilustra outra nítida vantagem do Novo Algoritmo em relação ao de Takagi. Para até cinco contingências, o que já pode ser considerado um número bastante exagerado no caso do sistema em estudo (Sul-Sudeste), a partir do ponto de falta f_2 o Novo Algoritmo já apresenta vantagens. Seu erro relativo tende a zero na medida que se aproxima o extremo da linha. Para o algoritmo de Takagi, o erro aumenta demasiadamente a partir do ponto de falta f_4 , chegando ao final da linha com erro elevadíssimo de 147 %, no caso de se considerar 20 % de erro na impedância de seqüência zero da linha.

4.0 FALHAS EM LINHA LONGA

Na linha de transmissão a ser estudada, simularam-se seis faltas monofásicas em pontos diversos, considerando, para cada um dos pontos de falta a serem analisados, ora uma resistência de arco de 0 Ω ora de 100 Ω . A configuração utilizada está representada na Figura 10, mostrando a área de interesse referente à configuração sul-sudeste/julho-98 do sistema elétrico da Companhia Energética de São Paulo – CESP. Foi colocada entre as barras das subestações de 440 KV, Ilha Solteira e Araraquara, uma linha de transmissão de circuito simples, transposta, totalizando 320 km de extensão. Ainda nessa figura, pode-se ver um localizador hipotético com base no Novo Algoritmo, instalado na subestação Ilha Solteira saída para Araraquara.

Utilizou-se como simulador o programa EMT/ATP, tendo por base a representação da linha por parâmetros distribuídos. Parte do teste é portanto a robustez do Novo Algoritmo à representação de linhas longas por parâmetros concentrados. Note-se que existe uma versão do Novo Algoritmo a parâmetros distribuídos,

mas o objetivo é mostrar não ser necessária sua utilização até extensões da ordem da do teste, bastando a versão a parâmetros concentrados.

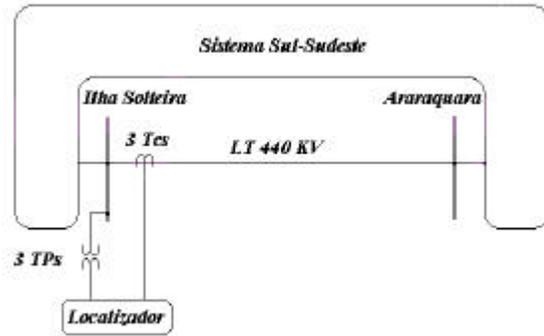


FIG. 10- CONFIGURAÇÃO PARA TESTE DE LINHA LONGA

Seis curto-circuitos monofásicos foram simulados no sistema da Figura 10; “ f_1 ” a 16 km, “ f_2 ” a 64 km, “ f_3 ” a 128 km, f_4 a 192 km, f_5 a 256 km e “ f_6 ” a 320 km da Ilha Solteira (barra “s”). Em todos pontos de falta citados, consideraram-se resistências de arco de 0 e 100 Ω .

Os resultados do teste estão representados na Figura 11, onde observa-se que o erro relativo na localização da falta tende a zero na medida que esta se aproxima do extremo mais afastado da linha, característica própria a este Novo Algoritmo. Mesmo utilizando-o em sua forma mais simples, ou seja, modelado para linhas de transmissão curtas, esse erro, em todos os pontos de falta, foi muito baixo para o comprimento de linha analisado. O gráfico mostra ainda que as curvas de erro relativo, em ambos os casos de resistências de arco simuladas, 0 e 100 Ω , são praticamente coincidentes. Isso indica a relativa independência do Novo Algoritmo em relação a essas resistências.

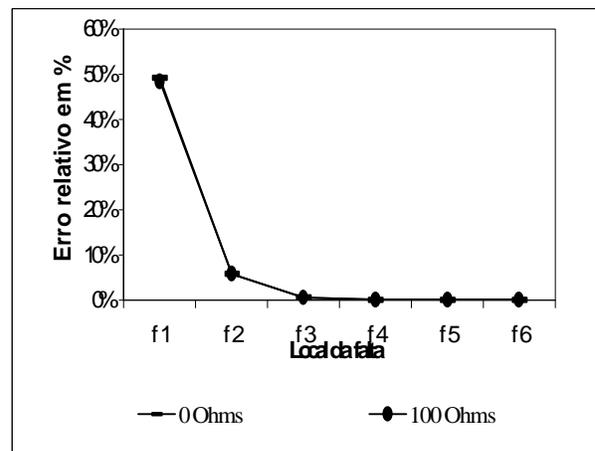


FIG. 11 – ERRO RELATIVO NO TESTE DE LINHA LONGA

5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados da aplicação de um Novo Algoritmo localizador de faltas, comparando-os aos de método tradicional na área. O método é totalmente estruturado sobre equivalentes de sequência positiva, em contraposição aos atualmente existentes, calcados sobre os equivalentes de sequência zero.

Os resultados dos testes comparativos mostram um algoritmo robusto a modificações nas impedâncias equivalentes vistas de seus terminais, resistindo mesmo a oito contingências no sistema CESP. Em outros testes efetuados foi determinada relativa insensibilidade do algoritmo também às mútuas e à transposição da linha.

Apesar de existir uma versão do algoritmo operando com representação a parâmetros distribuídos, teste com linha longa até 320 km operou a contento com o algoritmo usando apenas parâmetros concentrados.

Em geral, pode-se constatar no Novo Algoritmo flexibilidade para atender topologias complexas, insensibilidade a fatores locais e a seus próprios parâmetros. Sua comparação com o algoritmo de Takagi sempre indicou seu melhor desempenho. Mais que isto, por não depender de parâmetros de sequência zero, por exemplo da resistividade do solo, tais localizadores podem operar em regiões remotas, ou mesmo onde a alta resistividade tornasse proibitivos os métodos baseados na sequência zero.

Ao contrário dos outros métodos, que perdem sua precisão ao alcançar a parte final da linha, o Novo Algoritmo apresenta erro absoluto praticamente constante ao longo da mesma.

É interessante também observar que este novo método pode ser aplicado na concepção de um novo tipo de relé de distância. Seu algoritmo é bastante simples e de fácil implementação computacional, requisitos importantes para relés de baixo custo. Este novo relé de distância eliminaria todos os fatores de correção de terra e de acoplamento mútuo existentes nos atuais equipamentos. Além disso, também seriam abandonadas as tradicionais curvas características inerentes a cada tipo de relé, isto porque esse novo relé não teria curva característica, além de alcançar praticamente cem por cento da linha.

6.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) AVIZ,C.A.M; FILHO,L.C.C; MENDONÇA,F.S.R.; FEITOSA,J.L; Localização de Defeitos:Resultados Práticos na Eletronorte, IV Seminário Técnico de Proteção e Controle, 17/5 a 21/5/93, Fortaleza, Ceará.
- (2) TAKAGI,T; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M; KONDOW;R.; MATSUSHIMA,T.; Developments of A New Type of Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data, IEEE Trans. PAS-101, 1982, pp 2892 a 2898.
- (3) TAKAGI,T.; YAMAKOSHI, Y; BABA, J; UEMURA,K; SAKAGUSHI; A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I Fourier Transform Method, IEEE Trans PAS-100, pp.1316-1323, 1981.
- (4) TAKAGI,T; YAMAKOSHI, Y.; BABA, J; UEMURA,K.; SAKAGUSHI; A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part II Laplace Transform Method, IEEE Trans PAS-101, pp.564-573, 1982.
- (5) WISZNIIEWSKI, A.; How to Reduce Errors of Distance Fault Locating Algorithms, IEEE Trans, PAS-100, 1981,pp 4815-4820.
- (6) ERIKSON, L.; SAHA,M.M.; ROKEFELLER,G.D.; An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote and Infeed', IEEE Trans. 1985, PAS-104, pp 424-435.
- (7) RICHARDS G. G; TAN, O.T.; An Accurate Fault Location Estimation For Transmission Lines", IEEE Trans, 1982, PAS-101.
- (8) COPEL, Programa de Cálculo de Curto Circuito da Copel, versão junho de 1995.