

ANÁLISE COMPARATIVA DE ALGUNS ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DIGITAL DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Carlos Eduardo de Morais Pereira

Luiz Cera Zanetta Jr

PEA-POLI-USP

Caixa Postal 61548

CEP 05424-970 - São Paulo - SP

Resumo: Apresenta-se um estudo comparativo de alguns algoritmos de localização de falta em linhas de transmissão, que utilizam no cálculo da distância de falta as componentes de 60 Hz, extraídas com filtragem digital dos registros transitórios nos terminais da linha.

Através de uma análise paramétrica de variáveis influentes no fenômeno, o desempenho dos algoritmos é analisado, levando em conta o modelamento da linha de transmissão, e a utilização de dados de um ou mais terminais.

Palavras Chaves: localizador de falta, linha de transmissão, proteção.

Abstract: A comparative study of some fault location algorithms in transmission lines is presented, using in the calculation of the fault distance the 60 Hz filtered components of transients measurements at the line terminals.

Through a parametric analysis of variables present in the phenomenon, the performance of the algorithms is analyzed, taking into account the modeling of the transmission line using data of one or more line terminals.

Keywords: fault locator, transmission line, protection.

1 INTRODUÇÃO

Em um sistema de transmissão de energia elétrica é importante o conhecimento do local de ocorrência de curtos, sendo este aspecto estudado através dos sistemas localizadores digitais de falta.

Nas linhas de transmissão de alta tensão, a maioria das faltas (curtos) é transitória, sendo que estas podem se tornar permanentes, como por exemplo no caso de isoladores danificados, poluição, queimadas, ou mesmo queda de torres e quebra de condutores.

Para uma manutenção mais eficiente, com tempos de reparo reduzidos, é de vital importância uma localização prévia do defeito, de tal modo que o restabelecimento da transmissão de energia ocorra o mais rapidamente possível.

Mesmo no caso de defeitos não permanentes, a identificação do tipo e da distância de falta é importante, fornecendo informações úteis em estudos de proteção (Phadke e Thorp, 1988) e análise de desempenho frente a surtos atmosféricos, além de permitir a montagem de uma base histórica sobre as ocorrências de faltas numa linha de transmissão.

Neste trabalho será apresentada uma análise comparativa de alguns métodos existentes, que usam dados de um ou mais terminais da linha, sendo abordadas linhas de dois e três terminais. Um estudo paramétrico relativamente amplo de casos processados permite avaliar as condições de precisão dos métodos considerados.

Os métodos de localização de falta apresentados neste trabalho representam os principais métodos vistos na literatura, e utilizam os fasores em regime permanente das tensões e correntes das três fases de um ou mais terminais da linha, além dos parâmetros da mesma.

2 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA

2.1 Localização de Falta Utilizando Dados de Dois Terminais da Linha

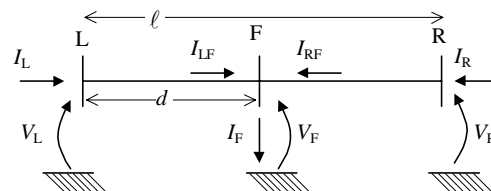


Figura 1 - Representação unifilar da linha de transmissão com falta

2.1.1 Método Modelando a Linha com Quadripólos

O método apresentado a seguir (Johns e Jamali, 1990) faz o equacionamento das tensões no ponto de falta na linha de transmissão com o uso de quadripólos, e utiliza os dados de ambos os terminais

Usando os dados do terminal local, tem-se:

$$V_F = \cosh(\gamma d)V_L - Z_c \sinh(\gamma d)I_L \quad (1)$$

Artigo Submetido em 08/02/1999

1a. Revisão em 12/07/1999; 2a. Revisão em 17/04/2000

Aceito sob recomendação do Ed. Consultor Prof. Dr. Jorge Coelho

Com os dados do terminal remoto:

$$V_F = \cosh(\gamma(\ell - d))V_R - Z_c \sinh(\gamma(\ell - d))I_R \quad (2)$$

Igualando-se (1) e (2), após simplificações, chega-se expressão para o cálculo da distância de falta (d):

$$d = \operatorname{atanh} \left(\frac{V_L - V_R \cosh(\gamma\ell) + Z_c I_R \sinh(\gamma\ell)}{Z_c I_L - V_R \sinh(\gamma\ell) + Z_c I_R \cosh(\gamma\ell)} \right) \frac{1}{\gamma} \quad (3)$$

Nas equações (1) a (3), os valores V_L , V_R , I_L , I_R , são os fasores sincronizados no tempo, das componentes fundamentais de sequência positiva, Z_c e γ são a impedância característica e a constante de propagação da linha, também para a sequência positiva.

2.1.2 Método Utilizando a Matriz de Impedância Série da Linha

A referência Girgis, Hart e Peterson (1992) descreve um método de localização de faltas baseado no equacionamento das tensões e correntes na condição de falta, utilizando a matriz de impedância série da linha de transmissão e supondo os dados de ambos os terminais da linha.

Várias publicações apresentam a mesma metodologia, podendo-se considerar esse trabalho com representante de uma família de métodos.

As equações básicas do método fornecem a tensão trifásica no ponto de falta, utilizando os dados dos dois terminais da linha de transmissão.

$$[V_F] = [V_L] - d[Z_{a,b,c}][I_L] \quad (4)$$

$$[V_F] = [V_R] - (\ell - d)[Z_{a,b,c}][I_R] \quad (5)$$

Igualando-se (4) e (5) e reagrupando, tem-se:

$$[V_L] - [V_R] + \ell[Z_{a,b,c}][I_R] = d[Z_{a,b,c}]([I_L] + [I_R]) \quad (6)$$

A partir de (6) distância de falta é estimada usando-se o método dos mínimos quadrados da seguinte maneira:

$$d = (\bar{F}^T F)^{-1} \bar{F}^T L \quad (7)$$

$$\text{Onde: } L = [V_L] - [V_R] + [Z_{a,b,c}][I_R] \ell \quad (8)$$

$$F = [Z_{a,b,c}]([I_L] + [I_R]) \quad (9)$$

Nas expressões de (4) a (9), tem-se:

\bar{F}^T : transposta da matriz F com os elementos conjugados

$[Z_{a,b,c}]$: matriz de impedância série da linha

$[V_L], [V_R], [I_L], [I_R]$: vetores trifásicos de tensão e corrente

2.2 Localização de Falta Utilizando Dados de Apenas um Terminal

Os métodos de localização de falta que utilizam apenas os dados do terminal local da linha, utilizam hipóteses simplificadoras para conseguir um equacionamento da distância de falta sem utilizar os dados do terminal remoto. Além disso, alguns métodos utilizam os dados da condição pré-falta da rede para minimizar o erro causado por algumas hipóteses consideradas.

O método utilizado a seguir foi proposto por Takagi *et alii*. (1981), sendo adotada neste trabalho a nomenclatura da figura a seguir:

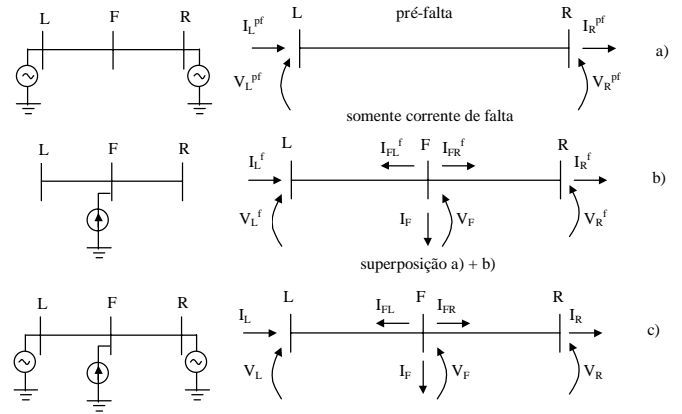


Figura 2 - Representação da falta com componentes superpostas

Da figura 2 b) verifica-se que:

$$V_F = R_F I_F \quad (10)$$

$$I_F = -(I_{FL}^f + I_{FR}^f) \quad (11)$$

Define-se:

$$K(d) = \frac{I_{FR}^f}{I_{FL}^f} \quad (12)$$

Usando (12) em (11) chega-se a:

$$I_F = -K(d)I_{FL}^f - I_{FL}^f \quad (13)$$

A equação (13) aplicada em (10) fornece:

$$V_F = -R_F I_{FL}^f (1 + K(d)) \quad (14)$$

Como os valores V_F e I_{FL}^f não são conhecidos, pode-se determiná-los usando os dados do terminal local, com a representação através de quadripólos:

$$V_F = A(d)V_L - B(d)I_L \quad (15)$$

$$I_{FL}^f = C(d)V_L^f - D(d)I_L^f \quad (16)$$

$$A(d) = \cosh(\gamma d) \quad B(d) = Z_c \sinh(\gamma d)$$

$$C(d) = Z_c^{-1} \sinh(\gamma d) \quad D(d) = A(d)$$

Usando-se (15) e (16) em (14) tem-se:

$$A(d)V_L - B(d)I_L = -R_F (C(d)V_L^f - D(d)I_L^f) (1 + K(d)) \quad (17)$$

Que pode ser escrita da forma:

$$\frac{A(d)V_L - B(d)I_L}{C(d)V_L^f - D(d)I_L^f} = -R_F (1 + K(d)) \quad (18)$$

Para a equação (18) são consideradas as seguintes hipóteses:

- R_F (resistência de falta) é puramente resistiva
- A relação $K(d)$ é um número real

Considerando-se as duas hipóteses anteriores, a equação (18) só possuiria parte real, sendo válida a seguinte equação:

$$\operatorname{Im} \left(\frac{A(d)V_L - B(d)I_L}{C(d)V_L^f - D(d)I_L^f} \right) = 0 \quad (19)$$

A equação (19) é aplicada para o caso de falta trifásica, e pode ser resolvida para a obtenção de d utilizando-se algum método iterativo como por exemplo o de Newton-Raphson.

Para falta fase-terra a expressão para cálculo da distância de falta utiliza dados das seqüências 0,1 e 2 :

$$\text{Im}\left(\frac{V_F^0 + V_F^1 + V_F^2}{C^1(d)V_L^{1f} - D^1(d)I_L^{1f}}\right) = 0 \quad (20)$$

$$V_F^0 + V_F^1 + V_F^2 = 3R_F I_F^1 \quad (21)$$

Para falta dupla-fase utiliza-se:

$$\text{Im}\left(\frac{V_F^1 - V_F^2}{C^1(d)V_L^{1f} - D^1(d)I_L^{1f}}\right) = 0 \quad (22)$$

$$V_F^1 - V_F^2 = R_F I_F^1 \quad (23)$$

Finalmente, para falta dupla fase-terra tem-se:

$$\text{Im}\left(\frac{V_F^1 - V_F^0}{C^0(d)V_L^{0f} - D^0(d)I_L^{0f}}\right) = 0 \quad (24)$$

$$V_F^1 - V_F^0 = -3R_F I_F^0 \quad (25)$$

Nas expressões (20) a (25) que derivam dos diagramas sequenciais para falta fase-terra, dupla-fase e dupla-fase-terra, as variáveis apresentam os índices 0,1 e 2, que indicam os valores sequenciais das variáveis da figura 2.

Nesse método, pode-se verificar que é importante armazenar adequadamente os valores pré-falta das tensões e correntes. Também é necessário saber qual o tipo de falta que ocorreu, pois o equacionamento é diferente para cada caso.

2.3 Localização de Falta em Linhas de Três Terminais Usando Quadripólos

Este método (Aggarwal *et alii*,1993) é análogo ao do caso de linha de dois terminais equacionada por quadripólos em 2.1.1, e utiliza os dados dos três terminais da linha. A distância de falta é dada pela seguinte expressão:

$$d = \text{atanh}\left(\frac{V_P - V_T \cosh(\gamma L_P) + Z_c I_{TP} \sinh(\gamma L_P)}{Z_c I_P - V_T \sinh(\gamma L_P) + Z_c I_{TP} \cdot \cosh(\gamma L_P)}\right) \frac{1}{\gamma} \quad (26)$$

Onde:

$$I_{TP} = -C(L_Q)V_Q + A(L_Q)I_Q - C(L_R)V_R + A(L_R)I_R \quad (27)$$

$$V_T = A(L_R)V_R - B(L_R)I_R \quad (28)$$

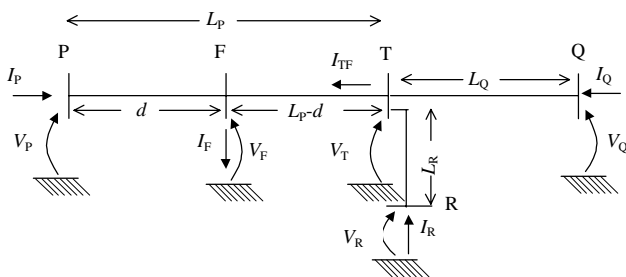


Figura 3 - Representação unifilar de uma linha de transmissão de três terminais com falta no trecho PT

A equação (26) fornece a distância da falta no caso desta ocorrer no trecho PT. Para o caso da falta ocorrer nos outros trechos o equacionamento seria análogo, trocando-se apenas as variáveis. Uma forma de se identificar o trecho em que ocorreu a falta é calcular a tensão V_T em função da tensão e corrente em cada um dos três terminais da linha de transmissão, sendo os trechos sem falta aqueles em que a tensão calculada V_T é a mesma:

$$\begin{aligned} V_T &= A(L_P)V_P - B(L_P)I_P \\ V_T &= A(L_Q)V_Q - B(L_Q)I_Q \\ V_T &= A(L_R)V_R - B(L_R)I_R \end{aligned} \quad (29)$$

3 FILTRAGEM DIGITAL USANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Um exemplo de método de filtragem digital usando esse princípio é apresentado na referência Sachdev e Nagpal (1991).

Neste trabalho a filtragem digital foi implementada utilizando-se o MMQ considerando-se a seguinte função aproximadora das ondas de tensão e corrente:

$$\begin{aligned} f(t) &= a_1 \cos(\omega t) + a_2 \text{sen}(\omega t) + a_3 \cos(2\omega t) + \dots \\ &+ a_4 \text{sen}(2\omega t) + a_{N-3} \cos((N/2-1)\omega t) + \dots \\ &+ a_{N-2} \text{sen}((N/2-1)\omega t) + a_{N-1} + a_N t \end{aligned} \quad (30)$$

A expressão (30) busca aproximar as formas de onda por componentes harmônicas e uma componente exponencial, (simplificada para um trecho de reta $a_{N-1} + a_N t$) de forma que a mesma não influencie na obtenção da fundamental.

As respostas em frequência para os filtros seno e cosseno obtidos a partir da expressão (30) associados a um filtro passa-baixas digital de Butterworth (Oppenheim e Schaffer,1975) foram as seguintes:

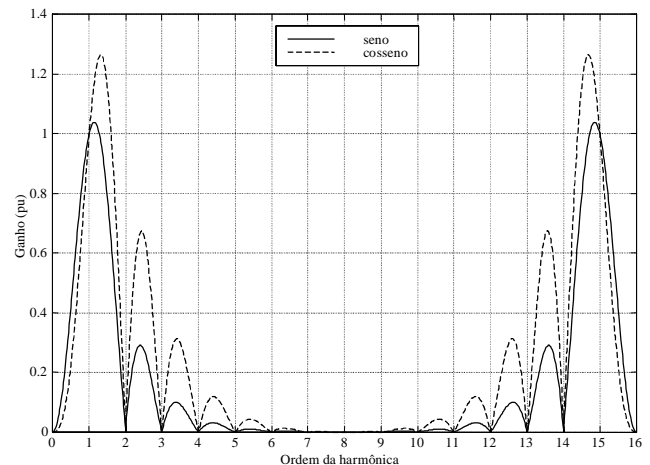


Figura 4 - Resposta em frequência dos filtros seno e cosseno (N=16) em série com filtro passa-baixas digital de Butterworth

O algoritmo de filtragem digital foi testado com base nas formas de onda de tensão e corrente nos terminais da linha, simulando-se uma falta trifásica na rede ilustrada a seguir.

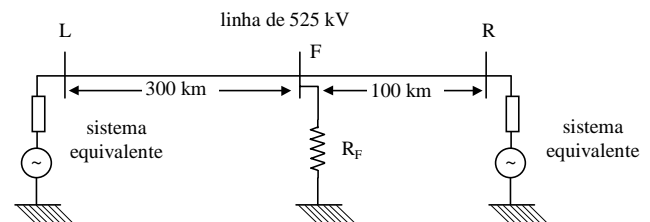


Figura 5 - Rede para teste do algoritmo de filtragem digital

A forma de onda típica de corrente e a saída do filtro digital (módulo da componente de 60 Hz) são as seguintes:

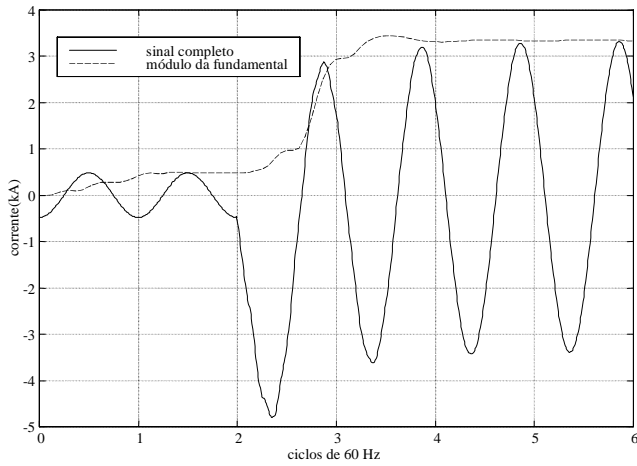


Figura 6 - Sinal de corrente na fase C do terminal local com componentes transitórias e módulo da fundamental

4 TESTE DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA

Os testes têm por objetivo avaliar a influência na precisão dos algoritmos causada por variações na distância de falta, resistência de falta, tipo de falta, comprimento da linha e parâmetros do equivalente da rede. Não foi analisada a influência da variação do instante de falta, teste muito usado na literatura para avaliar o comportamento da filtragem digital frente a diferentes níveis de componente contínua.

Para linhas de 2 terminais foi usada a rede da figura 5, mas com comprimento de linha de 400 km ou 50 km. As simulações foram realizadas com o programa ATP (Leuven EMTP Center, 1987), modelando a linha com parâmetros distribuídos e continuamente transposta.

O comprimento da linha influi na consideração correta das capacitâncias para a terra, principalmente quando a linha é longa, podendo afetar as hipóteses assumidas pelos métodos de localização de faltas aqui analisados, justificando-se uma análise da influência do comprimento da linha.

Para linhas de três terminais foi usada a seguinte rede.

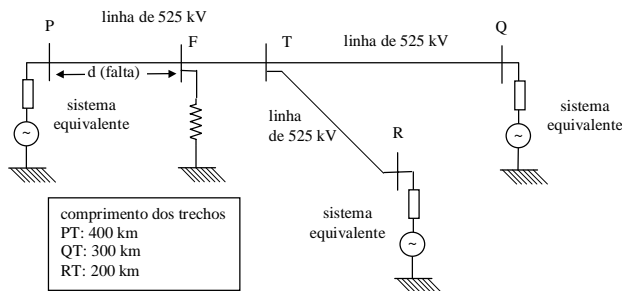


Figura 7 - Rede base para linha de três terminais

4.1 Resultados dos Testes Realizados para Linhas de Dois Terminais

O gráfico a seguir mostra os valores obtidos ao longo do tempo para uma falta fase terra a 300 km do terminal local da linha de 400 km. Para a análise dos resultados foram considerados os valores de distância obtidos no final do sexto ciclo da simulação (último instante disponível)

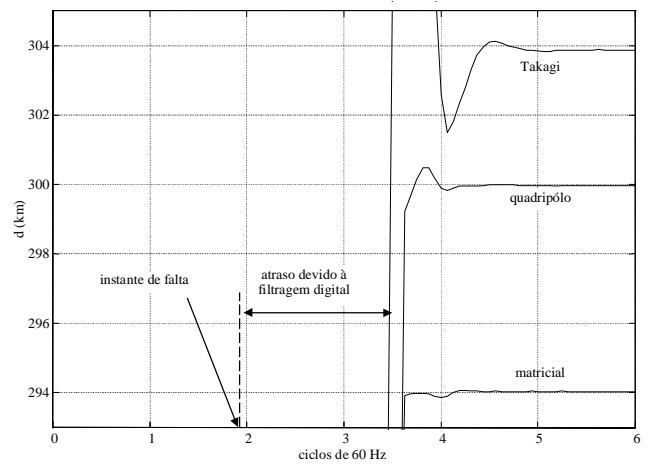


Figura 8 - Distância de falta ao terminal local

4.1.1 Influência da Variação da Distância de Falta

Para análise da influência da variação da distância de falta, no desempenho dos algoritmos estudados, foram simulados casos de falta fase-terra e trifásica, para linha curta e longa, considerando resistência de falta de 10 Ω.

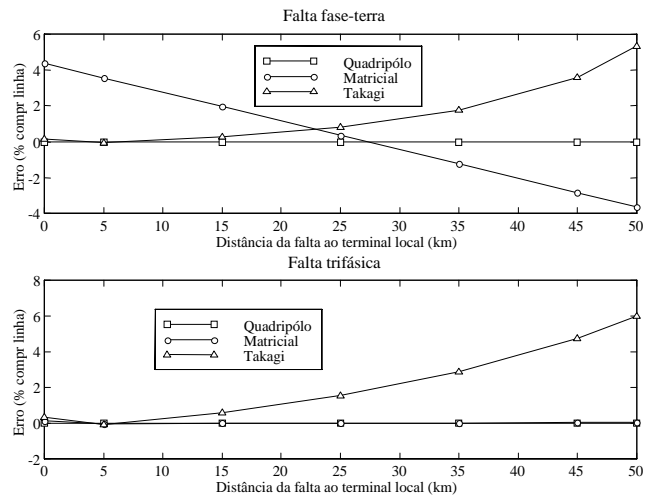


Figura 9 - Influência da distância de falta (linha curta)

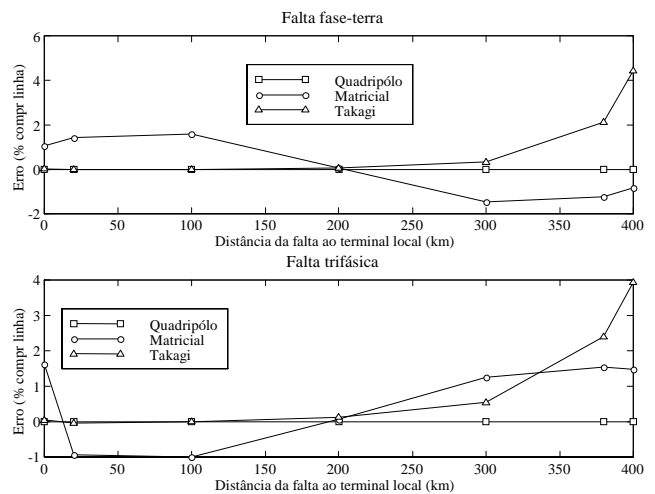


Figura 10 - Influência da distância de falta (linha longa)

Pode-se verificar que o método com quadripólos é insensível à variação da distância de falta, enquanto o método matricial é preciso para faltas no meio da linha e o de Takagi é mais impreciso quanto mais distante do terminal local ocorre a falta.

4.1.2 Influência da Variação da Resistência de Falta

Foram simulados casos de falta fase-terra e falta trifásica, para linha curta e longa, com distância de falta de 35 km, para linha curta, e 300 km para linha longa. Foram considerando resistências de falta de 0 a 40 Ω .

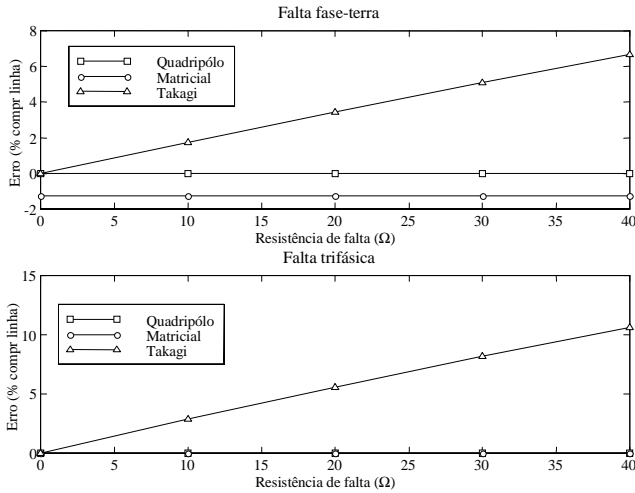


Figura 11 - Influência da resistência de falta (linha curta)

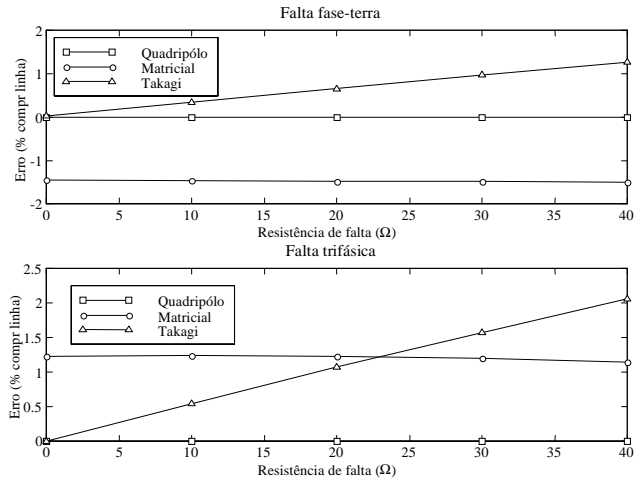


Figura 12 - Influência da resistência de falta (linha longa)

Conforme pode ser observado nos gráficos, novamente verifica-se que o método com quadripólos tem a precisão independente da resistência de falta, o mesmo acontece com o método matricial. Por outro lado, o método de Takagi é mais impreciso quanto maior é a resistência de falta.

4.1.3 Influência da Variação do Tipo de Falta

Foram simulados todos os tipos possíveis de falta, para linha curta e longa. Com distância de falta de 35 km, para linha curta, e 300 km para linha longa, e resistência de falta de 10 Ω .

O método com quadripólos também não apresenta variações na precisão com a mudança do tipo de falta. Para linhas curtas, o método matricial é preciso para faltas que não envolvem a terra. Quanto ao método de Takagi, verifica-se que é mais impreciso para faltas trifásicas.

4.1.4 Influência da Variação do Módulo da Impedância do Equivalente no Terminal Local

Foram simulados casos de falta fase-terra e falta trifásica, para linha curta e longa, com distância de falta de 35 km, para linha curta, e 300 km para linha longa. Os valores do módulo da impedância do equivalente no terminal local utilizados foram

20%, 50% 100% e 200% do caso base, no qual o terminal local apresenta $P_{CC}3\Phi=13 \angle 80^\circ$ GVA e $P_{CC}\Phi_t=14 \angle 82^\circ$ GVA.

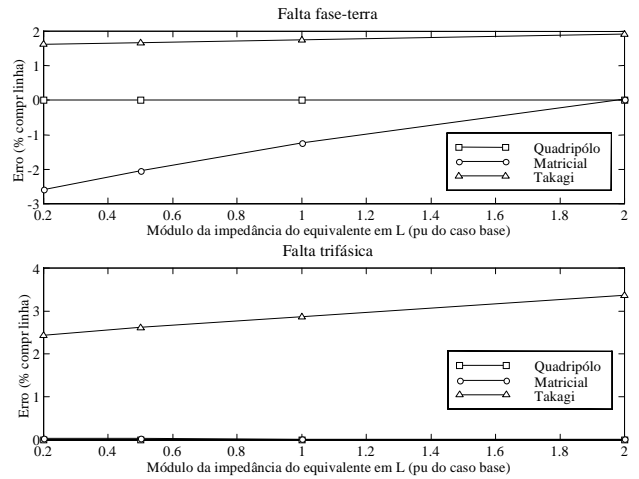


Figura 13 – Influência do módulo da impedância do equivalente (linha curta)

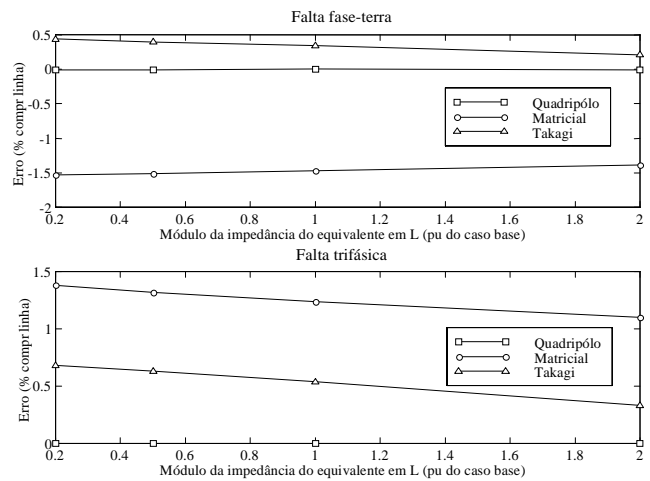


Figura 14 - Influência do módulo da impedância do equivalente (linha longa)

As figuras mostram que a precisão dos métodos depende pouco do módulo da impedância do equivalentes.

4.1.5 Influência da Variação da Fase da Impedância do Equivalente no Terminal Local

Foram simulados casos de falta fase-terra e falta trifásica, para linha curta e longa, com distância de falta de 35 km, para linha curta, e 300 km para linha longa. Utilizaram-se diferentes valores para a fase da impedância do equivalente no terminal local, mantendo-se o valor do módulo da impedância, isso corresponde a variar a componente resistiva.

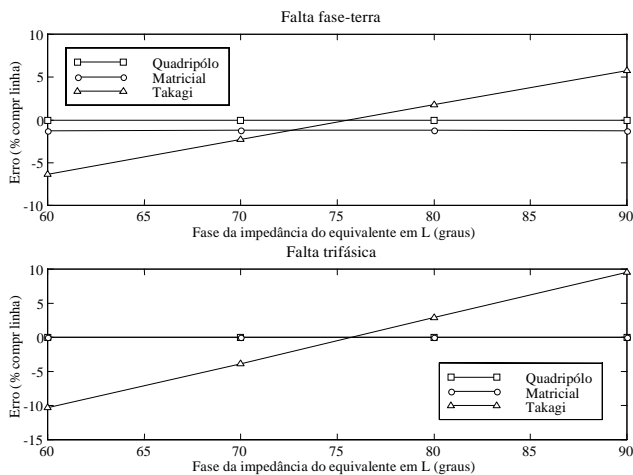


Figura 15 - Influência da fase da impedância do equivalente (linha curta)

Para linha longa os resultados foram praticamente os mesmos que para linha curta. Pose-se verificar que apenas o método de Takagi tem a precisão influenciada pelo valor da fase dos equivalentes.

4.2 Resultados dos Testes Realizados para Linhas de Três Terminais

Os testes mostraram que a precisão do método não é afetada por variação da distância de falta, resistência de falta, tipo de falta, sendo mostrados apenas os resultados para variação da distância de falta, quando foram simuladas faltas fase-terra e trifásicas no trecho PT, com resistência de falta de 10 Ω.

Tabela 1 - Influência da variação da distância de falta

	distância de falta real (km)	distância de falta (km)	erro absoluto (km)	erro relativo (%)
falta fase-terra	0	-0,03	-0,03	-0,01
	100	99,87	-0,13	-0,03
	200	200,05	0,05	0,01
	300	300,01	0,01	0,00
	400	399,97	-0,03	-0,01
falta trifásica	0	-0,08	-0,08	-0,02
	100	99,97	-0,03	-0,01
	200	200,02	0,02	0,00
	300	300,00	0,00	0,00
	400	400,00	0,00	0,00

Da tabela I pode-se verificar que o método é bem preciso, obtendo a distância de falta com um erro máximo de 80 m. Foi verificado que o grau de precisão do método independe da variação de parâmetros como resistência de falta, tipo de falta, equivalentes, etc.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma análise envolvendo um número considerável de avaliações do comportamento de alguns algoritmos conhecidos diante de alterações de variáveis influentes no curto-circuito.

Estas avaliações permitiram uma análise comparativa dos algoritmos estudados diante das diversas condições de redes elétricas. Para tornar possível a obtenção destes resultados, apresentados de forma condensada neste trabalho, os algoritmos de localização de faltas e os métodos de filtragem digital foram implementados através da linguagem MODELS do ATP, viabilizando a obtenção de resultados paramétricos.

Os resultados mostram que os métodos de localização de faltas mais precisos são os que foram obtidos a partir do

equacionamento das tensões e correntes nos terminais da linha, com o uso de quadripólos e que modelam as linhas considerando parâmetros distribuídos, para linha de dois terminais (Johns e Jamali,1990), e três terminais (Aggarwal *et alii*,1993), sendo sua precisão independente dos diversos fatores analisados, tais como distância de falta e resistência de falta.

O método proposto por Takagi *et alii* (1981), tem a precisão prejudicada no caso de faltas distantes do terminal local, resistência de falta elevada, e equivalentes com parte resistiva grande, porém sua maior vantagem é utilizar dados de apenas um terminal da linha.

O método com uso de matrizes trifásicas (Girgis, Hart e Peterson,1992) apresentou maiores imprecisões para o caso de linha longa, devido ao fato de não considerar correções hiperbólicas nem a capacitância da linha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggarwal, R.K. *et alii*. (1993). A Practical Approach to Accurate Fault Location on Extra High Voltage Teed Feeders. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, p. 874-83.
- Girgis, A.A., Hart, D.G. and Peterson, W.L. (1992). A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 98-107.
- Johns, A. T. and Jamali, S. (1990). Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 137, n. 6, p. 395-402.
- Leuven EMTP Center (1987). *ATP: Alternative Transients Program Rule Book*. Leuven, K.U.
- Oppenheim, A. V. and Schaffer, R. W. (1975). *Digital Signal Processing*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- Phadke, A. G. and Thorp, J. S. (1988). *Computer Relaying for Power Systems*, Tauton, Research Studies Press.
- Sachdev, M. S. and Nagpal, M. A (1991). Recursive Least Squares Algorithm for Power System Relaying and Measurement Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 3, p. 1008-1015.
- Takagi, T. *et alii*. (1981). Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n 8, p. 2892-2898.