



XVI SNPTEE
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

GRUPO V
PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

GPC/015

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
UTILIZANDO DADOS DE TENSÃO E CORRENTE DE UM TERMINAL**

Eduardo Gonzaga da Silveira*
PROTLab / LRC / UFMG

Clever Pereira
PROTLab / LRC / UFMG

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo comparativo de técnicas de localização de faltas em linhas de transmissão, com a utilização de sinais de apenas um dos terminais. São descritos e implementados computacionalmente os métodos de Wiszniewski (1), Takagi (2) e RL série, este último utilizado em alguns relés comerciais. Várias situações, simuladas no EMTP, são testadas, com ajustes na distância ao ponto de falta, tipo de falta, ângulo de incidência, resistência de falta e capacidade das fontes (SIR). Apresenta-se também resultados da aplicação destes algoritmos a casos reais, provenientes do sistema elétrico brasileiro, de forma a testá-los em condições reais de operação. Os testes comprovam que o ajuste no número dos regressores do filtro estimador, aliado a um método adequado de eliminação da resistência de falta, pode trazer bons resultados, principalmente para os casos onde não há grande discrepância entre as fontes terminais.

PALAVRAS-CHAVE: Localização de Faltas, Proteção Digital, Estimção de Parâmetros, Linhas de Transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Quando da ocorrência de uma falta em uma linha de transmissão, cabe aos relés de proteção a detecção, identificação e sinalização desta falta de forma rápida e confiável. A função de localização de falta, muitas vezes presente nos modernos relés numéricos, é implementada na grande maioria das vezes como uma função acessória, através de algoritmos simples onde não se executa a tarefa de eliminação dos efeitos da

resistência de falta, comprometendo as estimativas obtidas. Tal fato não pode ocorrer nos sistemas localizadores de falta, pois são eles que vão fornecer grande parte das informações necessárias para a execução das tarefas de inspeção, manutenção e reparo das linhas. As estimativas devem ser as mais precisas possíveis, pois um erro de poucos quilômetros pode representar uma busca penosa pelo ponto exato da falta para as equipes de reparo. E isto vai levar certamente a maiores tempos para a remoção do defeito, ocasionando perdas técnicas e financeiras para a concessionária. Entretanto, o atual avanço da tecnologia digital e das técnicas de processamento de sinais tem possibilitado o desenvolvimento de novos algoritmos, conduzindo, com custos razoáveis, a significativas melhoras nas estimativas de localização de faltas nos sistemas de transmissão de energia.

Com o objetivo de se avançar nas pesquisas relacionadas à proteção digital, pesquisas estas que tiveram início na UFMG com a criação do programa DIGIPROT (4), onde foram implementadas as tarefas relacionadas a um relé de proteção, iniciou-se o desenvolvimento do programa LDF-1 (Localizador Digital de Faltas de Um Terminal), para tratar do problema da localização fina de faltas, inicialmente com dados apenas de um terminal. Neste trabalho são apresentados alguns dos resultados obtidos com a utilização deste programa, mostrando o estágio atualmente alcançado pela equipe, bem como o seu potencial para futuros estudos relacionados ao tema.

A Figura 1 apresenta as etapas básicas envolvidas num programa de localização de faltas, mostrando as principais fases a serem executadas. O processo tem início com a leitura dos dados de entrada provenientes do terminal local. Segue o pré-condicionamento destes sinais através de uma filtragem anti-aliasing adequada

ao filtro estimador utilizado na fase de estimação dos fasores associados à fundamental. Em seguida executa-se a determinação do instante da falta, de modo a permitir a determinação clara dos períodos pré e pós-falta. O passo seguinte é a identificação da falta, de forma a selecionar quais grandezas serão utilizadas pelo algoritmo na localização. Finalmente segue a aplicação destas grandezas ao algoritmo propriamente dito para a estimativa da distância até o ponto de falta, podendo inclusive fornecer estimativas do comportamento da resistência de falta durante o processo de localização.

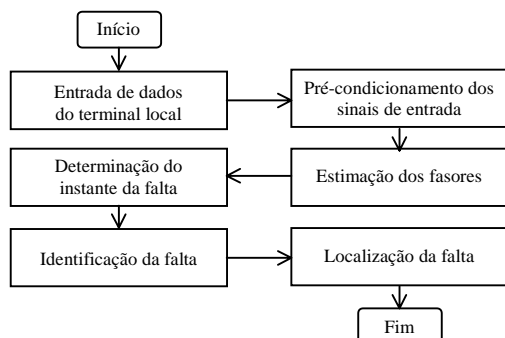


FIGURA 1 – Algoritmo de localização de faltas

2.0 - ROTINAS DE PRÉ-LOCALIZAÇÃO

2.1 - Obtenção de dados

O programa LDF-1 começa sua tarefa lendo um arquivo contendo dados da linha monitorada e outro com dados relativos às tensões e correntes aquisitionadas na linha. Estes dados podem estar num arquivo ASCII de saída do EMTP ou em formato semelhante, como por exemplo, no formato COMTRADE, resultantes da oscilografia digital de um oscilógrafo ou registrador digital de perturbações (RDP).

2.2 - Filtragem anti-aliasing

Antes de qualquer processamento nos sinais de entrada é essencial um correto pré-processamento destes dados. A primeira tarefa é a execução de uma filtragem anti-aliasing adequada ao filtro estimador apresentado no item a seguir. A Figura 2 mostra o efeito desta filtragem, apresentando as ondas de tensão, original e filtrada, em uma linha trifásica onde ocorreu uma falta AT (fase A para terra), utilizando um filtro anti-aliasing, com frequência de corte 120 Hz.

2.3 - Estimação dos fasores fundamentais

A localização de faltas utilizando informações provenientes do 60 Hz requer uma correta extração dos fasores fundamentais das ondas de entrada, de modo a não influenciar negativamente nos resultados dos algoritmos de localização.

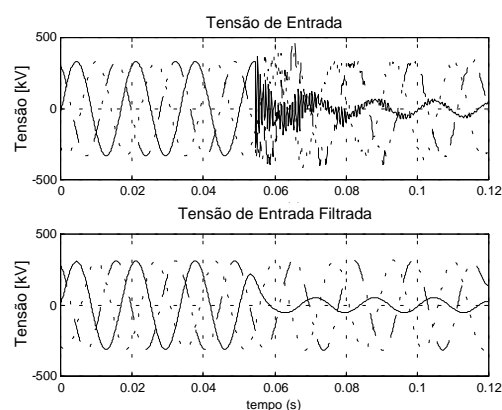


FIGURA 2 – Ondas de tensão de entrada original e filtrada para um curto AT

Considerando a grande experiência da equipe do PROTLab/UFGM com filtros estimadores(3,4), foi implementado no LDF-1 uma variação do método dos erros mínimos quadrados, onde se admite sinais de entrada formados por uma exponencial decrescente, aproximada por uma reta, e uma onda senoidal fundamental (3).

2.4 - Detecção do instante da falta

As técnicas de localização geralmente necessitam de amostras dos períodos pré e pós-falta. Portanto, é necessária a exata determinação da amostra na qual a falta tem início, de modo a se obter estes dois conjuntos de forma bem definida. A determinação do instante de início da falta é feita no LDF-1 através do monitor de transitórios, cujo princípio de funcionamento é explicado a seguir.

O filtro de mínimos quadrados, citado no item anterior, utiliza um conjunto de amostras contidas numa janela de dados para estimar os fasores de frequência fundamental. Quando esta janela contém amostras dos períodos pré e pós-falta, as estimativas não são confiáveis e se distanciam do valor real. Este fato é mostrado na Figura 3, onde se vê uma onda de corrente amostrada (com dados pré e pós-falta) e a onda estimada. Nota-se que estas ondas apresentam grandes diferenças nos instantes iniciais da falta, quando as janelas de dados estão contaminadas.

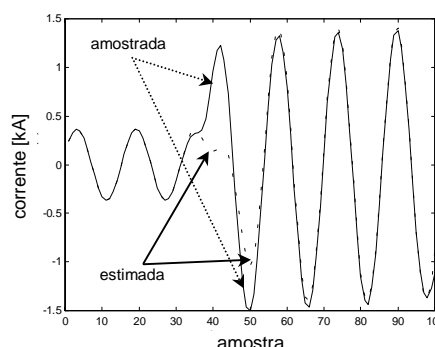


FIGURA 3 – Ondas de corrente amostrada e estimada

Denotando-se os valores amostrados conhecidos por y e os valores estimados por \hat{y} , pode-se calcular o erro (ou resíduo) em um determinado instante t_k por

$$r_k = y_k - \hat{y}_k \quad (1)$$

Para a detecção do instante da falta, o monitor de transitórios registra os resíduos gerados e soma seus módulos a cada janela de dados de forma que

$$M_k = \sum_{i=0}^{NPC-1} |r_{k-i}| \quad (2)$$

onde M_k é o valor do monitor de transitórios em cada instante k e NPC é o número de pontos amostrados por ciclo da fundamental. Uma mudança significativa no valor de M_k indica que ocorreu um transitório. Com este raciocínio determina-se o instante em que a falta teve início.

A Figura 4 a seguir mostra a evolução do valor de M_k para as ondas de corrente da Figura 3.

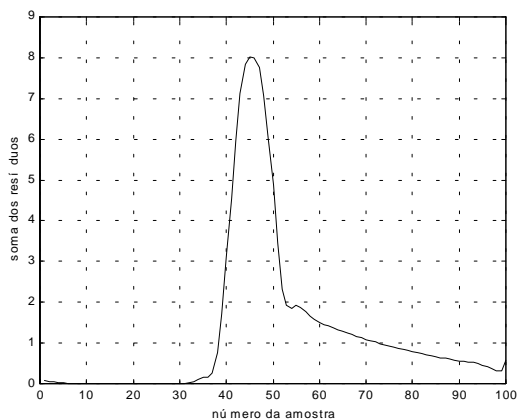


FIGURA 4 – Evolução do valor de M_k .

2.5 - Identificação da falta

A identificação da falta com a determinação do tipo da falta e, conseqüentemente das fases envolvidas, permite facilitar a tarefa de inspeção e reparo da linha. No programa LDF-1 a identificação é feita através do uso de um relé de distância do tipo mho ou paralelogramo. Quando a impedância vista por este relé entra e permanece por um certo tempo, ajustável pelo usuário, dentro de sua característica de operação, ocorre a confirmação da falta.

Quando acontece uma falta, a impedância vista pelo relé situado no terminal “S” da linha é dada por

$$Z_{relé} = \frac{V_S}{I_S} = d \cdot Z_1 + R_F \left(1 + \frac{I_R}{I_S} \right) \quad (3)$$

sendo os índices “S” e “R” referentes às grandezas relacionadas ao terminal local e remoto da linha de

transmissão respectivamente, R_F a resistência de falta, d a distância até o ponto de falta e Z_1 a impedância longitudinal unitária de seqüência positiva da linha.

Na equação (3), os fasores V_S e I_S são determinados pelo filtro estimador de mínimos quadrados. As grandezas para determinação de $Z_{relé}$ são dadas pela Tabela 1, onde m é o fator de compensação de seqüência zero da LT.

TABELA 1 - Grandezas para determinação de Z_S

Relé	AT	BT	CT	AB	BC	CA
V_S	V_a	V_b	V_c	$V_a - V_b$	$V_b - V_c$	$V_c - V_a$
I_S	$I_a + mI_{a0}$	$I_b + mI_{b0}$	$I_c + mI_{c0}$	$I_a - I_b$	$I_b - I_c$	$I_c - I_a$

A Figura 5 ilustra o comportamento das unidades MHO do relé de distância para uma falta AT, com resistência de falta 0Ω , a 50km.

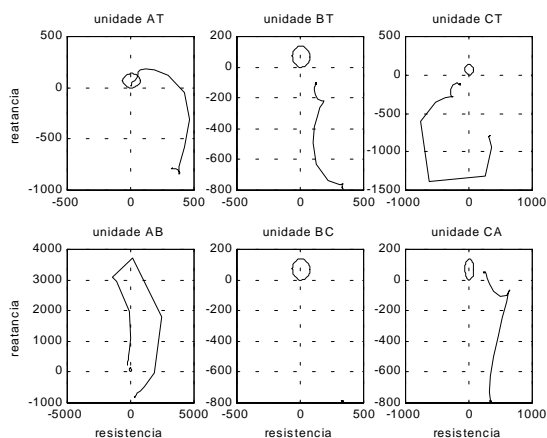


FIGURA 5 – Unidades do relé de distância

3.0 - LOCALIZADORES DE FALTA

3.1 - Algoritmo de Takagi (1)

O método apresenta uma técnica baseada nas equações de ondas viajantes em uma linha de transmissão. Considere a falta no ponto F , a uma distância d de S , da linha de transmissão SR , como mostra a Figura 6.

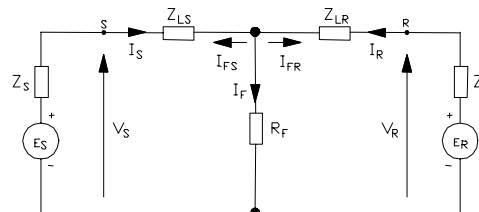


FIGURA 6 - Circuito em falta

O teorema da superposição para circuitos lineares permite separar a rede em falta em duas derivadas: uma rede pré-falta e outra pura de falta, como mostrado nas Figuras 7 e 8.

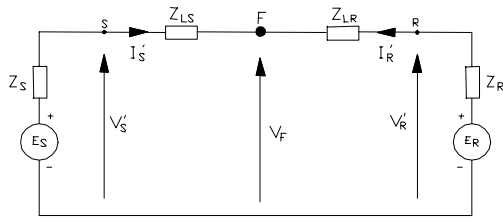


FIGURA 7 – Circuito pré-falta

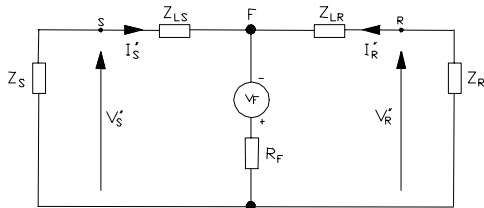


FIGURA 8 – Circuito puro de falta

No método, a localização da falta é feita resolvendo-se a equação

$$\text{Im} \left[\frac{A(d)V_S - B(d)I_S}{C(d)V_S'' - D(d)I_S''} \right] = 0 \quad (4)$$

onde $\text{Im}[\cdot]$ representa a parte imaginária. A solução da equação (4) é a distância da extremidade local da linha ao ponto de falta. Os termos $A(d)$, $B(d)$, $C(d)$ e $D(d)$ são as constantes generalizadas do quadripolo associado ao trecho SF da linha, dadas por

$$A(d) = D(d) = \cosh(\lambda d) \quad (5)$$

$$B(d) = Z_c \sinh(\lambda d) \quad (6)$$

$$C(d) = Y_c \sinh(\lambda d) \quad (7)$$

onde λ é a constante de propagação e Z_c a impedância característica da linha de transmissão, ambas de seqüência positiva.

Os valores de V_S e I_S são obtidos diretamente no terminal local S , através do uso do filtro estimador, enquanto os valores de V_S'' e I_S'' do circuito puro de falta (ver Figura 8) são calculados a partir dos valores de falta e pré-falta utilizando

$$V_S'' = V_S - V'_S \quad (8)$$

$$I_S'' = I_S - I'_S \quad (9)$$

A equação (4) contém apenas uma variável desconhecida d , fasores obtidos localmente e parâmetros da linha. Logo, o processo de localização pode ser realizado sem nenhum dado do terminal remoto. Esta equação não inclui a resistência de falta R_F , mostrando que o algoritmo não necessita de seu valor na determinação da distância até à falta.

3.2 – Algoritmo de Wiszniewski (2)

O cálculo da distância para a falta se inicia a partir da expressão da impedância vista do terminal S , que é composta da impedância da linha e pela resistência de falta como mostrado na equação (10).

$$Z_{relé} = Z_S = Z_{LS} + R_F \left(\frac{I_F}{I_S} \right) \quad (10)$$

O diagrama da Figura 9 mostra a rede elétrica assumida pelo autor, apresentando a situação de um curto-circuito através de uma resistência de falta R_F .

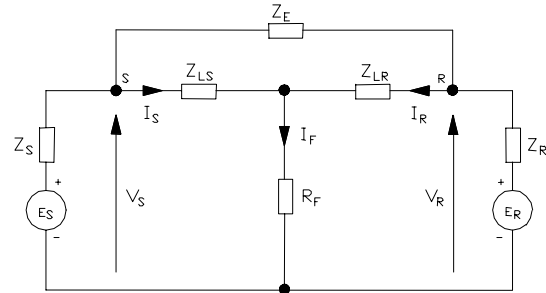


FIGURA 9 – Sistema em falta

Como no método anterior, utiliza-se novamente o princípio da superposição. Desta forma, o circuito em falta pode ser considerado como a soma do circuito pré-falta, com o circuito puro de falta, mostrados nas Figuras 10 e 11.

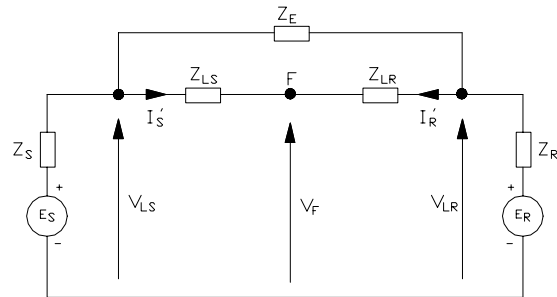


FIGURA 10 – Circuito pré-falta

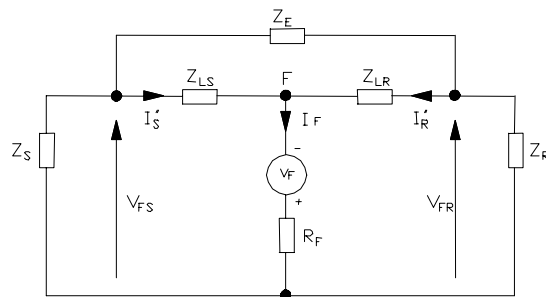


FIGURA 11 – Circuito puro de falta

As expressões finais e os passos para utilização do algoritmo são:

- Determinar Z_{LS} e Z_{LR}

$$\begin{aligned} Z_{LS} &= X_S \cot \phi_{LS} + jX_S \\ Z_{LR} &= Z_{SR} - Z_{LS} \end{aligned} \quad (11)$$

- Determinar o fator de distribuição K

$$\begin{aligned} K &= \frac{(Z_{LR} + Z_R)Z_E(Z_S + Z_R)Z_{LR}}{(Z_S + Z_{LS} + Z_R + Z_{LR})Z_E + (Z_{LS} + Z_{LR})(Z_S + Z_R)} \\ K &= |K| e^{j\gamma} \end{aligned} \quad (12)$$

- Determinar X_{LS}

$$X_{LS} = X_S - \frac{R_S A \tan \phi_{SR} - X_S}{\frac{a}{b} \tan \phi_{SR} - 1} \quad (13)$$

onde

$$a = \operatorname{Re} \left(\frac{I_S - I'_S}{I_S e^{j\gamma}} \right) \quad (14)$$

$$b = \operatorname{Im} \left(\frac{I_S - I'_S}{I_S e^{j\gamma}} \right) \quad (15)$$

O valor da distância até o ponto de falta é obtido dividindo-se o valor de X_{LS} pela reatância longitudinal unitária de seqüência positiva da linha monitorada.

3.3 – Algoritmo baseado no modelo de linha

Este algoritmo é baseado no modelo RL série de uma linha de transmissão, conforme mostra a Figura 12 a seguir, sendo utilizado em alguns relés de distância comerciais para localização de falta.

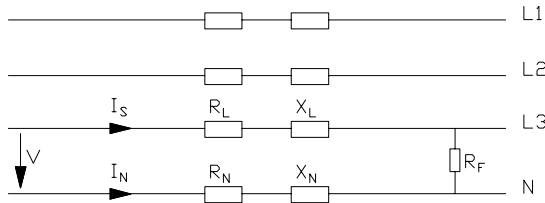


FIGURA 12 – Modelo RL série utilizado no algoritmo comercial

A equação diferencial para o loop em falta é:

$$L \left(\frac{di_L}{dt} - \frac{x_N}{x_L} \frac{di_N}{dt} \right) + R_L \left(i_L - \frac{R_N}{R_L} i_N \right) = V \quad (16)$$

Definindo

$$k_R = \frac{R_N}{R_L} = \frac{1}{3} \left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right) \quad (17)$$

$$k_X = \frac{X_N}{X_L} = \frac{1}{3} \left(\frac{X_0}{X_1} - 1 \right) \quad (18)$$

substituindo (16) e (17) em (15) e fazendo a aproximação de (di/dt) por

$$\frac{di}{dt} = \frac{i_k - i_{k-1}}{\Delta t} \quad (19)$$

resulta em

$$\begin{aligned} V_k &= \frac{L}{\Delta t} (i_{Lk} - i_{Lk-1}) + \frac{L}{\Delta t} k_X (i_{Nk} - i_{Nk-1}) + \\ &+ R_L i_{Lk} - k_R R_L i_{Nk} \end{aligned} \quad (20)$$

Escrevendo a equação (19) para dois instantes consecutivos de tempo $k-1$ e k e resolvendo, chega-se a

$$\begin{aligned} R_L &= \frac{V_{k-1} [i_k - i_{k-1} + k_X (i_{Nk} - i_{Nk-1})] \Lambda}{[(i_{k-1} + k_R i_{Nk-1})(i_k - i_{k-1} + k_X (i_{Nk} - i_{Nk-1}))] \Lambda} K \\ \Lambda &= \frac{\Lambda - V_k [(i_{k-1} - i_{k-2} - k_X (i_{Nk-1} - i_{Nk-2}))]}{\Lambda - [(i_k + k_R i_{Nk})(i_{k-1} - i_{k-2} + k_X (i_{Nk-1} - i_{Nk-2}))]} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} L &= \Delta t \left(\frac{V_{k-1} (i_k + k_R i_{Nk}) \Lambda}{(i_k + k_R i_{Nk})(i_{k-1} - i_{k-2} + k_X (i_{Nk-1} - i_{Nk-2})) \Lambda} \Lambda \right. \\ &\left. \Lambda \frac{\Lambda - V_k (i_{k-1} + k_R i_{Nk-1})}{\Lambda - (i_{k-1} + k_R i_{Nk-1})(i_k - i_{k-1} + k_X (i_{Nk} - i_{Nk-1}))} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

4.0 – RESULTADOS OBTIDOS

Para analisar o desempenho dos algoritmos implementados no LDF-1, foram realizados vários testes. Foram simuladas no EMTP diversas faltas, variando-se as distâncias, os ângulos de incidência, a resistência de falta e a capacidade das fontes equivalentes terminais (SIR). A seguir são apresentadas tabelas com os principais resultados associados aos erros obtidos com a aplicação dos três algoritmos de localização fina de falta implementados no LDF-1. As letras W, T e RL correspondem respectivamente aos algoritmos de Wiszniewski, Takagi e ao método RL série de relés comerciais. Os sobrescritos ^(M) e ^(Z) indicam instante de incidência da falta quando a tensão no ponto de falta passava pelo valor máximo e por zero, correspondendo a situações de máxima presença de altas freqüências e máxima excursão respectivamente. As tabelas 2, 3 e 4 referem-se a faltas simuladas.

TABELA 2 – Caso simulado com $d = 50$ km e $SIR = 1$

R_F (Ω)	FALTA	Erro (%)		
		W	T	RL
0	AT ^(M)	2,42	-2,24	5,42
	AT ^(Z)	-0,54	-0,46	8,82
	AB ^(M)	-0,06	-0,46	23,69
	AB ^(Z)	0,06	-0,22	37,53
30	AT ^(M)	-1,32	-0,54	1,91
	AT ^(Z)	-2,24	2,42	0,13
	AB ^(M)	-3,68	1,14	-6,21
	AB ^(Z)	1,36	2,78	-5,16

TABELA 3 – Caso simulado com $d = 350$ km e $SIR = 1$

R_F (Ω)	FALTA	Erro (%)		
		W	T	RL
0	AT ^(M)	-0,18	-0,87	5,42
	AT ^(Z)	0,38	0,09	8,82
	AB ^(M)	4,28	-0,25	23,63
	AB ^(Z)	3,83	-0,34	37,53
30	AT ^(M)	-1,02	-3,74	1,91
	AT ^(Z)	-0,17	-3,81	-5,58
	AB ^(M)	3,26	-3,25	-6,21
	AB ^(Z)	3,78	-3,07	-5,16

TABELA 4 – Caso simulado com $d = 350$ km e $SIR = 10$

R_F (Ω)	FALTA	Erro (%)		
		W	T	RL
0	AT ^(M)	-5,70	-3,26	4,49
	AT ^(Z)	-5,66	-3,02	5,32
	AB ^(M)	0,14	-0,72	10,15
	AB ^(Z)	0,08	-0,88	10,5
30	AT ^(M)	-30,30	-30,18	-11,22
	AT ^(Z)	-30,36	-29,82	311,89
	AB ^(M)	-66,52	-65,08	10,89
	AB ^(Z)	-66,46	-63,92	-78,71

A tabela 5 apresenta os resultados da aplicação do LDF-1 a dois casos reais, ocorridos no sistema elétrico brasileiro.

TABELA 5 – Casos reais com $d = 72,2$ km

FALTA	Erro (%)		
	W	T	C
AT	-3,39	0,19	10,55
ABT	-2,53	-3,78	-6,14

5.0 - CONCLUSÕES

Os estudos realizados mostraram que o pré-processamento adequado dos sinais de entrada, juntamente com a utilização de algoritmos que reduzem o efeito da resistência de falta, conduz a bons resultados na localização fina de faltas em linhas de transmissão, mesmo utilizando-se dados apenas de um terminal, principalmente quando não existem grandes diferenças entre as fontes equivalentes terminais. Neste processo deve ser destacada a importância do ajuste da frequência de corte do filtro anti-aliasing e da escolha dos regressores do filtro de mínimos quadrados.

Os testes realizados comprovaram a eficiência do monitor de transitórios implementado no LDF-1 na tarefa de determinação do instante inicial da falta. Em todos os casos, simulados e reais, ele operou

corretamente, obtendo-se um atraso máximo na detecção do instante inicial da falta de 1 ms (aproximadamente uma amostra).

Nos casos simulados com $SIR=1$ (fontes equivalentes terminais de mesma capacidade), o erro de localização se manteve menor que 5% para os algoritmos de Wiszniewski e Takagi, mesmo em condições extremamente adversas de faltas no final da linha, máxima presença da componente contínua e resistência de falta elevada. Para o algoritmo comercial, baseado no modelo de linha, o desempenho quase sempre era insatisfatório, o que já era esperado, uma vez que o algoritmo não possuía nenhuma compensação para a resistência de falta. Por outro lado, nos casos simulados com $SIR=10$ (fonte fraca do lado do localizador), o desempenho de todos os algoritmos foi insatisfatório, mostrando claramente as limitações destes métodos, onde se utilizam grandezas de apenas um dos terminais da linha monitorada.

Nos casos reais, os erros ficaram dentro de limites aceitáveis, exceto para o algoritmo comercial de modelo de linha, evidenciando que os ajustes efetuados nos testes simulados se mantiveram adequados para os casos reais.

Todos os estudos foram feitos utilizando-se o programa LDF-1 desenvolvido pela equipe do PROTLab/UFMG, mostrando sua capacidade de aplicação em estudos da localização fina de falta em linhas de transmissão.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TAKAGI, T., YAMAKOSHI, Y., BABA, J., UEMURA, K., SAKAGUSHI, "A New Algorithm of na Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines Part I Fourier Transform Method", IEEE Trans PAS-101, pp.564-573,1982.
- (2) WISZNIEWSKI, A., "How to Reduce Errors of Distance Fault Location Algorithms", IEEE Trans. PAS-100, pp. 4815-4820, 1981.
- (3) PEREIRA, C., CRUZ, F. C., "Análise do Comportamento Estático e Dinâmico dos Filtros Digitais de Mínimos Quadrados na Proteção de Linhas de Transmissão", XV SNPTEE, 1999.
- (4) PEREIRA, C., CRUZ, F. C. & VISACRO, S. "Teaching Transmission Line Digital Protection using a Didactic PC Compatible Program" In 37TH CIGRÉ BIENNIAL SESSION - I WORKSHOP LINKS UNIVERSITY CIGRÉ, 37, 09/1998, Paris, França. Anais...Paris: Vol. LUC, p. LUC 07/01 - LUC 07/06, 08/1998.
- (5) PHADKE, A. G., THORP, J. S., "Computer Relaying for Power Systems", 1988, Reseach Studies Press, Tauton, Somerset, England/John Wiley&Sons Inc., New York Center.