



**VII Seminário Técnico de Proteção e Controle
22 a 27 de Junho de 2003
Rio de Janeiro - RJ**

Artigo 37554003:

**ALGORITMO PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Eduardo C. Senger^{1*}
(senger@pea.usp.br)

Giovanni Manassero Jr.^{1*}
(giomanjr@pea.usp.br)

Francisco A. Reis Filho^{1*}
(mother@pea.usp.br)

Renato M. Nakagomi^{1*}
(rmikio@pea.usp.br)

Harald Wehrend²
(h.wehrend@newage-avkseg.com)

Biao Zhang²
(b.zhang@newage-avkseg.com)

Stefan Bauschke²
(s.bauschke@newage-avkseg.com)

(1) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – PEA – EPUSP

(2) NEWAGE-AVKSEG, BU Power Protection

1 RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação, em uma rotina computacional, de um algoritmo para a localização de faltas em linhas de transmissão. Esse algoritmo integra o software de um relé digital de distância, que está sendo desenvolvido pelo grupo de proteção do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da EPUSP em parceria com a empresa alemã NEWAGE-AVKSEG. A função de localização de faltas proposta utiliza os fasores de pré e pós falta das tensões e correntes, obtidos a partir dos registros de oscilografia efetuados pelo relé de distância somente no terminal local da linha. Para que esses fasores sejam extraídos da forma mais precisa possível foi desenvolvido um procedimento específico, também apresentado neste artigo.

Palavras Chave: proteção de linhas, relés de distância, localização de faltas.

2 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão estão sujeitas a faltas provocadas por uma variedade de situações, tais como, condições atmosféricas adversas, falhas em equipamentos, acidentes, etc. Os defeitos nestas linhas resultam em um grande número de problemas relacionados à confiabilidade do serviço e à qualidade da energia entregue aos consumidores. Desta forma, quando ocorre uma falta é necessário identificar rápida e corretamente o local do evento de forma a minimizar o tempo de restauração do serviço.

Os algoritmos para localização de faltas em linhas de transmissão propostos na literatura podem ser

divididos em dois grupos principais: algoritmos que utilizam grandezas elétricas (normalmente fasores de tensões e correntes) medidas apenas no terminal local da linha [1], [2], [3] e [4]; e algoritmos que exigem a medição das grandezas elétricas tanto no terminal local quanto no terminal remoto da linha (p. ex. para linhas de três terminais são necessárias medições nos três terminais da linha) [5] e [6].

A precisão do processo de localização de faltas do primeiro grupo de algoritmos é inferior à precisão do segundo grupo, uma vez que não há informações sobre a corrente no terminal remoto. Sendo assim, os algoritmos de localização de faltas baseados apenas em medições efetuadas no terminal local normalmente exigem dados complementares, tais como: fasores de pré-falta; impedâncias equivalentes dos dois terminais; etc.

Apesar do segundo grupo de algoritmos apresentar um índice de precisão superior ao do primeiro, ele requer um canal de comunicação, que envie os dados registrados em cada um dos terminais, para funcionar corretamente.

Desta forma, optou-se pelo desenvolvimento de uma função de localização de faltas baseada apenas nos dados do terminal local, visto que na proteção de distância normalmente não se utiliza um canal de comunicação para a troca de dados entre os relés dos dois terminais da linha e, além disso, a função de localização de faltas deve estar disponível mesmo quando o relé opera individualmente (*stand-alone*).

3 FUNÇÃO LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

A função localização de faltas utiliza os fasores de pré e pós falta, calculados a partir dos registros de oscilografia efetuados pelo relé de distância. Para que esses fasores sejam calculados da forma mais precisa

*PEA – Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Luciano Gualberto, 158 - trav. 3 CEP 05508-900 São Paulo/SP

possível foi desenvolvido o procedimento ilustrado na figura 1. Para cada uma das etapas desse procedimento foram desenvolvidos algoritmos específicos que fazem parte da função de localização de faltas.



Figura 1: Diagrama de blocos da função de localização de faltas.

3.1 Filtragem da componente exponencial amortecida

A técnica mais comum para o cálculo dos fasores das tensões e correntes é a transformada discreta de Fourier (TDF) utilizando uma janela de 1 ciclo. Sabe-se que a principal fonte de erro para essa técnica é a componente exponencial amortecida presente principalmente no sinal da corrente de curto-circuito. Sendo assim, é conveniente pré-filtrar os sinais registrados pelo relé, de forma a remover essa componente antes de aplicar a TDF. Desenvolveu-se, portanto, um filtro digital, que tem por objetivo filtrar os sinais de tensão e corrente, de forma a eliminar a componente exponencial amortecida eventualmente presente nas formas de onda e, dessa forma, reduzir o erro na estimativa dos fasores de pré e pós falta calculados com a TDF.

A equação de diferenças para esse filtro é constituída basicamente pelo filtro FIR (*Finite Impulse Response*) descrito pela expressão (1):

$$y_k = a_0 \cdot x_k + a_1 \cdot x_{k-m} \quad (1)$$

Os valores mais adequados para os parâmetros a_0 , a_1 e m dependem da frequência fundamental do sinal (f) e da taxa de amostragem utilizada no relé (n). A tabela 1 mostra os valores calculados para os parâmetros do filtro em função dessas duas grandezas.

Tabela 1: Valores dos parâmetros do filtro DC

f (Hz)	n	m	a_0	a_1
50	32	8	1.3498588	-0.59526775
60	32	8	0.7889609	-0.6144434

3.2 Identificação do instante de ocorrência do defeito e posicionamento das janelas

Para que as janelas de pré e pós falta sejam corretamente posicionadas é necessário que a rotina de localização de faltas disponha de um algoritmo que localize no registro de oscilografia em qual amostra o defeito ocorreu.

Após a determinação do instante de falta, duas janelas de 1 ciclo devem ser convenientemente posicionadas na pré e na pós-falta para o cálculo dos respectivos fasores. Para o posicionamento das janelas, o algoritmo admite que os registros de oscilografia das correntes são constituídos por três regiões, conforme ilustrado na figura 2.

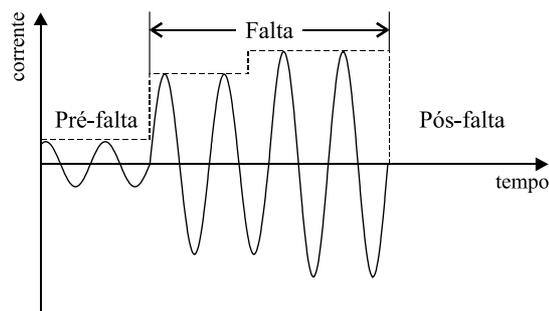


Figura 2: Exemplo de registro de oscilografia

A primeira região é a pré-falta, onde as correntes apresentam amplitudes típicas das correntes de carga; a segunda região corresponde ao trecho de falta, caracterizado por um aumento significativo de pelo menos uma das correntes; a terceira região é o trecho de pós-falta (após a abertura do disjuntor). Para que seja possível determinar o instante de ocorrência da falta, as duas primeiras regiões devem necessariamente estar presentes na oscilografia e devem possuir duração superior a 2 ciclos cada uma.

A técnica desenvolvida para determinar o instante de ocorrência da falta consiste em admitir que a amplitude da corrente em um trecho homogêneo obedece a uma distribuição estatística aproximadamente normal. Desta forma, o algoritmo percorre o registro dos sinais de corrente calculando para cada amostra k , a amplitude (através da DFT), a amplitude média e a variância média (através de dois filtros de média móvel do tipo IIR – *Infinite Impulse Response*).

A partir desses três filtros o algoritmo estima a probabilidade de ocorrência de uma transição no sinal na amostra k e determina se houve transição ou não.

Quando é encontrado um ponto de transição, a posição da amostra k é armazenada e o algoritmo verifica se essa transição corresponde ao instante de ocorrência da falta, ou à abertura de disjuntor (corrente nula), conforme ilustrado na figura 3

Além disso, o algoritmo desenvolvido admite que a região de falta pode não ser homogênea, isto é, podem existir variações nas amplitudes das correntes dentro dessa região. Isto ocorre quando há evolução no tipo de

falta (p. ex. uma falta se inicia como fase-terra e após alguns ciclos evolui para dupla-fase-terra).

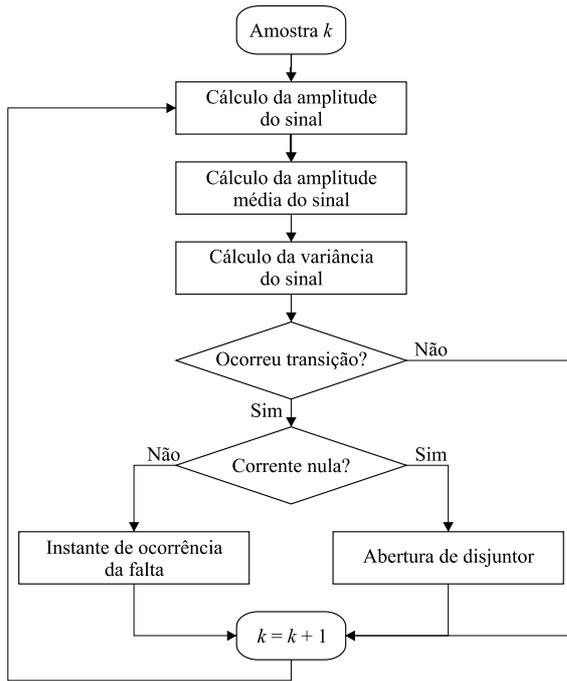


Figura 3: Diagrama de blocos do algoritmo de determinação do instante de falta

3.3 Cálculo dos fasores de pré e pós falta

Após a determinação do instante de ocorrência da falta, duas janelas de um ciclo são posicionadas convenientemente na região de pré e pós-falta. Os respectivos fasores podem então ser calculados utilizando a TDF como indicado pela expressão mostrada abaixo:

$$f_{asor} = \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cdot \cos\left(\frac{m \cdot 2 \cdot \pi}{N}\right) - j \cdot \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cdot \sin\left(\frac{m \cdot 2 \cdot \pi}{N}\right) \quad (2)$$

onde:

- x_m : amostras do sinal contidas nas janelas de pré ou pós falta;
- N : número de amostras por ciclo da fundamental.

3.4 Classificação

O algoritmo de classificação do tipo de falta baseia-se na análise da informação contida nas componentes simétricas das correntes superpostas de falta (obs. correntes superpostas são definidas como a diferença entre as correntes de pré e pós falta em cada uma das três fases).

Inicialmente, o algoritmo determina se a falta é trifásica, isto é, se a componente de seqüência positiva possui uma amplitude significativamente maior que a amplitude das seqüências negativa e zero.

Se essa condição não for satisfeita, o segundo passo é determinar se o curto é fase-terra (AN, BN, CN) ou dupla-fase (AB, BC, CA). Essa discriminação é feita observando-se a defasagem (θ) entre a componente de seqüência positiva e negativa das correntes superpostas de falta.

A tabela 2 apresenta o valor da defasagem entre a componente de seqüência positiva e negativa das correntes superpostas, para os curtos-circuitos fase-terra e dupla-fase.

Tabela 2: Componentes de seqüências positiva e negativa para cada tipo de falta

Tipo de falta			
	Fase-Terra		Dupla-Fase
AN			BC
BN			AB
CN			CA

A partir dos resultados apresentados nessa tabela conclui-se que, monitorando-se a defasagem entre as componentes superpostas de seqüência positiva e negativa dos sinais de corrente (valores assumidos pelo ângulo θ), é possível diferenciar os curtos fase-terra dos curtos dupla-fase, conforme ilustrado na figura 4.

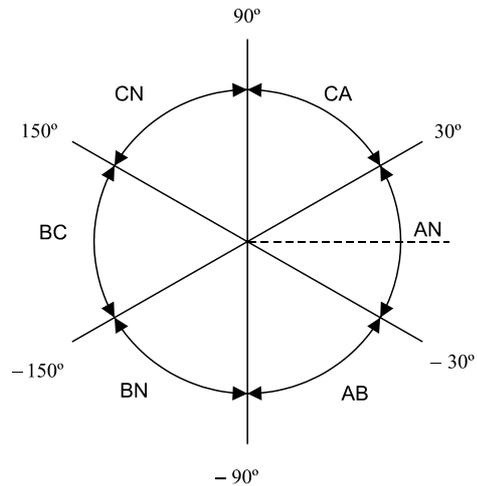


Figura 4: Relação entre o ângulo θ e o tipo de falta

O último passo é determinar se os curtos dupla-fase são, na verdade, dupla-fase-terra. Para tanto, o algoritmo de classificação da falta verifica se há presença da componente de seqüência zero nos sinais superpostos de corrente. A figura 5 ilustra o algoritmo para classificação do tipo de falta.

O cálculo do ângulo θ é feito utilizando o procedimento adotado abaixo. Dado:

$$\theta = \angle I_1 - \angle I_2 \quad [3.a]$$

logo:

$$\theta = \angle(I_1/I_2) = \angle(I_1 \cdot I_2^*/|I_2|^2) = \angle(I_1 \cdot I_2^*) \quad [3.b]$$

Onde:

$$I_1 = I_{1R} + j \cdot I_{1I} : \text{Componente de seqüência positiva}$$

$$I_2 = I_{2R} + j \cdot I_{2I} : \text{Componente de seqüência negativa}$$

Desta forma:

$$\theta = \angle(I_1 \cdot I_2^*) = \angle(A + j \cdot B) \quad [3.c]$$

Onde:

$$A = I_{1R} \cdot I_{2R} + I_{1I} \cdot I_{2I}$$

$$B = I_{1I} \cdot I_{2R} - I_{1R} \cdot I_{2I}$$

Finalmente:

$$\tan \theta = \frac{B}{A} \quad [3.d]$$

Os fatores A e B são calculados, a partir das componentes de seqüência positiva e negativa das correntes. Optou-se por desenvolver o equacionamento apresentado acima, para evitar a necessidade de implementação de rotinas para tratamento de números complexos no *firmware* do relé.

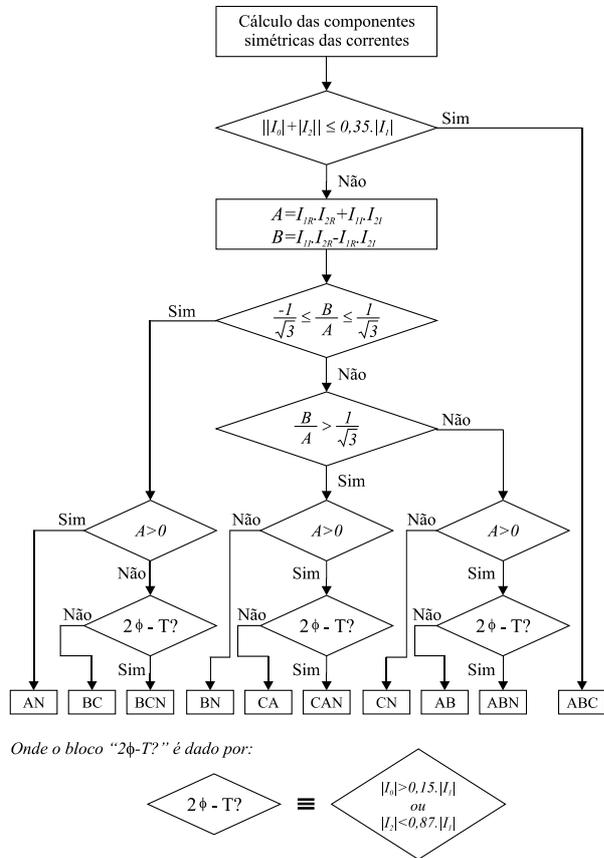


Figura 5: Algoritmo para classificação da falta

A tabela 3 apresenta a relação entre o tipo de curto-circuito e os valores assumidos pela razão B/A .

Tabela 3: Relação entre $\tan \theta$ e o tipo de falta

Tipo de falta	θ	$\tan \theta = B/A$
AN	$-30^\circ < \theta < 30^\circ$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq \frac{B}{A} \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$
CA	$30^\circ < \theta < 90^\circ$	$\frac{B}{A} \geq \frac{1}{\sqrt{3}}$
CN	$90^\circ < \theta < 150^\circ$	$\frac{B}{A} \leq -\frac{1}{\sqrt{3}}$
BC	$150^\circ < \theta < 210^\circ$	$-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq \frac{B}{A} \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$
BN	$150^\circ < \theta < -90^\circ$	$\frac{B}{A} \geq \frac{1}{\sqrt{3}}$
AB	$-90^\circ < \theta < -30^\circ$	$\frac{B}{A} \leq -\frac{1}{\sqrt{3}}$

O algoritmo de classificação apresentado na figura 5 é capaz de classificar faltas não só em linhas de transmissão com transformador Y-Y, mas também em linhas com transformador Y- Δ , conforme ilustrado pelo sistema da figura 6.

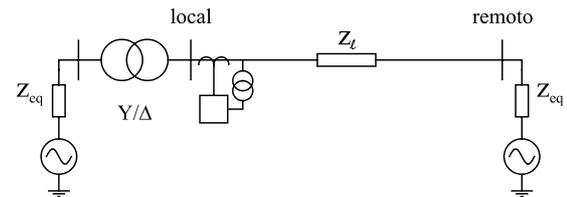


Figura 6: Linha com transformador Y/ Δ

Para um curto-circuito do tipo AN nesse sistema, os sinais de corrente se comportam conforme apresentado na figura 7. Observando esse comportamento podemos confundir o curto-circuito fase-terra (AN), com um curto-circuito dupla-fase (AB). Entretanto, o algoritmo de classificação da falta classifica o evento corretamente, como um curto-circuito fase-terra (AN).

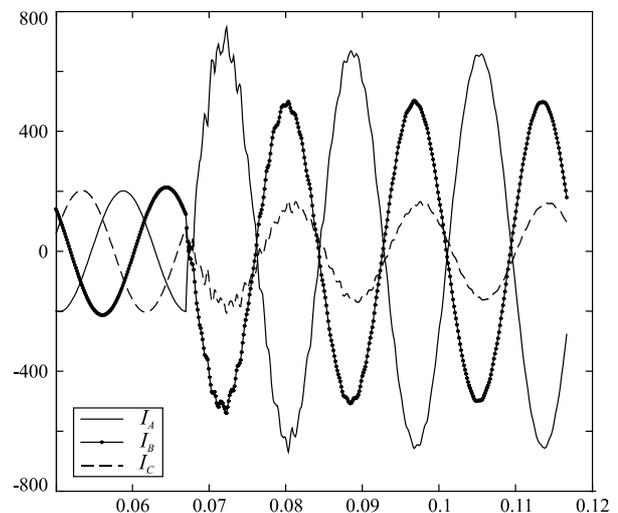


Figura 7: Correntes de falta

3.5 Localização

O algoritmo de localização de faltas proposto neste artigo baseia-se na referência [1]. O algoritmo descrito nessa referência utiliza um equacionamento baseado no modelo de quadripolo π -corrigido para a linha de transmissão. Esse algoritmo não considera a assimetria entre as fases (linha totalmente transposta) e o cálculo da distância da falta é obtido através de um processo iterativo com a utilização de funções hiperbólicas.

Durante o desenvolvimento e implementação da função de localização de faltas proposta neste artigo, algumas modificações foram incorporadas com os seguintes objetivos: melhorar a resposta do algoritmo em sistemas de transmissão com circuito duplo (onde a componente de seqüência zero da linha vizinha pode interferir no cálculo da distância) e diminuir a carga computacional do algoritmo.

Para tanto, foi utilizado um equacionamento similar ao do trabalho descrito na referência [1], porém baseado no modelo de linha curta, isto é, as capacitâncias são desprezadas e não são utilizadas funções hiperbólicas, conforme apresentado na referência [5]. É importante ressaltar que para linhas de subtransmissão essa simplificação não implica em redução significativa de precisão. Além disso, o cálculo da distância da falta é feito de forma direta, sem processo iterativo.

Basicamente, o algoritmo descrito neste artigo utiliza o resultado do algoritmo de classificação da falta, para determinar o conjunto de equações a ser utilizado, e os fasores de tensão e corrente para o cálculo da localização da falta.

Para cada tipo de curto-circuito existe uma equação específica que relaciona os fasores de tensão e corrente e a distância da falta. A seguir estão apresentadas essas equações para cada tipo de falta.

- Curto-circuito 3ϕ :

$$d = \frac{\text{Im}\{V_1^{pos} \cdot I_1^{f*}\}}{\text{Im}\{z_1 I_1^{pos} \cdot I_1^{f*}\}} \quad (4.a)$$

- Curto-circuito ϕ -T:

$$d = \frac{\text{Im}\{(V_0^{pos} + V_1^{pos} + V_2^{pos}) \cdot I_1^{f*}\}}{\text{Im}\{(z_0 I_0^{pos} + z_m I_0' + z_1 I_1^{pos} + z_2 I_2^{pos}) \cdot I_1^{f*}\}} \quad (4.b)$$

- Curto-circuito ϕ - ϕ :

$$d = \frac{\text{Im}\{(V_1^{pos} - V_2^{pos}) \cdot I_1^{f*}\}}{\text{Im}\{(z_1 I_1^{pos} - z_2 I_2^{pos}) \cdot I_1^{f*}\}} \quad (4.c)$$

- Curto-circuito 2ϕ -T:

$$d = \frac{\text{Im}\{(V_1^{pos} - V_0^{pos}) \cdot I_0^*\}}{\text{Im}\{(z_1 I_1^{pos} - z_0 I_0^{pos} - z_m I_0') \cdot I_0^*\}} \quad (4.d)$$

Onde:

d : distância calculada pelo algoritmo;

V_0, V_1 e V_2 : componentes simétricas das tensões medidas no terminal local;

I_0, I_1 e I_2 : componentes simétricas das correntes medidas no terminal local;

z_0, z_1 e z_2 : impedâncias seqüenciais da linha;

z_m, I_0' : impedância mútua e corrente mútua de seqüência zero.

A figura 8 apresenta o diagrama de blocos para o algoritmo de localização de faltas.

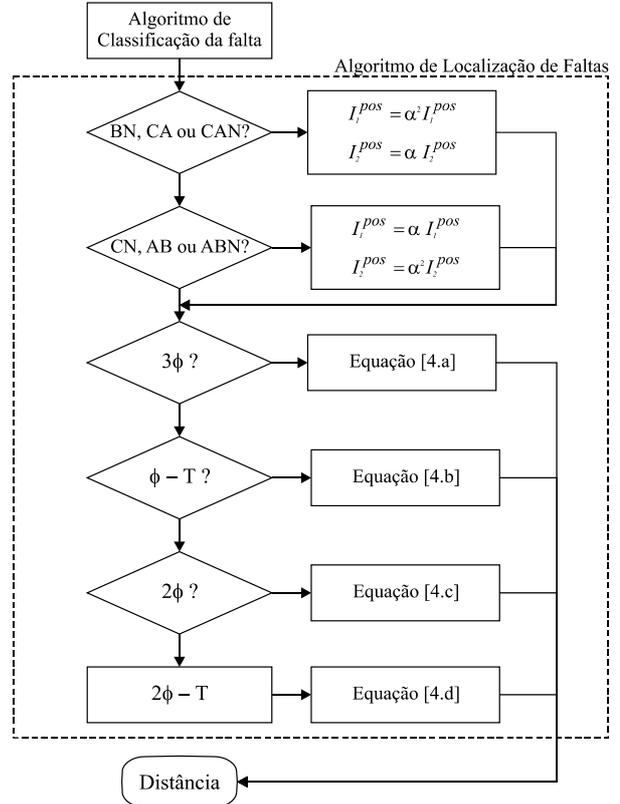


Figura 8: Diagrama do algoritmo de localização

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A função de localização de faltas proposta foi implementada utilizando o programa MATLAB. Após a fase de testes, essa função foi codificada em ANSI C, para posterior implementação no *firmware* do relé.

Os algoritmos desenvolvidos foram submetidos a diversos testes utilizando dados fornecidos por simulações do ATP (*Alternative Transient Program*). Nestas simulações foram utilizados os seguintes sistemas de transmissão:

- circuito duplo com transformador Y/Y;
- circuito simples com transformador Y/ Δ ;
- circuito simples com transformador Y/Y, e;
- circuito radial com transformador Y/Y.

Para todas as simulações foram adotados os seguintes parâmetros:

- nível de tensão: 138 [kV];
- comprimento das linhas: 100 [km];

- distâncias de curto-circuito: 25, 50 e 75 [km] do terminal local.

A partir dos parâmetros e os tipos de sistemas apresentados acima, foram simulados 175 casos. A figura 9 apresenta o diagrama das linhas de transmissão simuladas e a tabela 4 os casos de simulação.

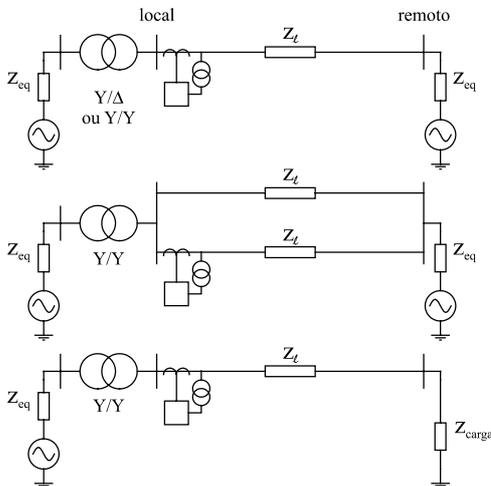


Figura 9: Sistemas de transmissão modelados no ATP

Tabela 4: Descrição dos casos simulados

Tipo	Dist. [km]	Equivalente local [Ω]	Equivalente remoto [Ω]	Rf [Ω]			
AN	25 50 75	$Z_0 = 0,444 + j \cdot 14,81$	$Z_0 = 0,571 + j \cdot 19,04$ $Z_1 = 0,816 + j \cdot 27,21$	5 e 20			
BN							
CN							
AB			$Z_0 = 0,190 + j \cdot 6,35$ $Z_1 = 0,272 + j \cdot 9,07$				
BC							
CA							
ABN							
BCN							
CAN							
ABC							

A tabela 5 apresenta o erro percentual agrupado para cada tipo de curto-circuito, considerando todas as simulações a que o algoritmo foi submetido. Pode-se notar que, tanto o erro para cada um dos tipos de curto-circuito, como o erro global, é inferior a 3%. O que indica que a precisão da função de localização de faltas pode ser considerada satisfatória. As figuras 10 e 11 apresentam os histogramas de erro para os curtos-circuitos fase-terra e trifásico, dentre os 175 casos simulados.

Tabela 5: Erro percentual x Tipo de curto-circuito

Erro %	Tipo de curto-circuito				
	ϕ -T	ϕ - ϕ	2 ϕ -T	3 ϕ	global
	0.71	2.65	1.86	0.44	1.34

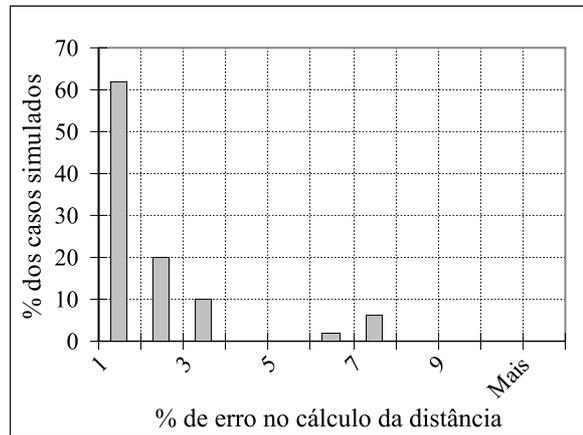


Figura 10: Resposta da função para faltas F-T

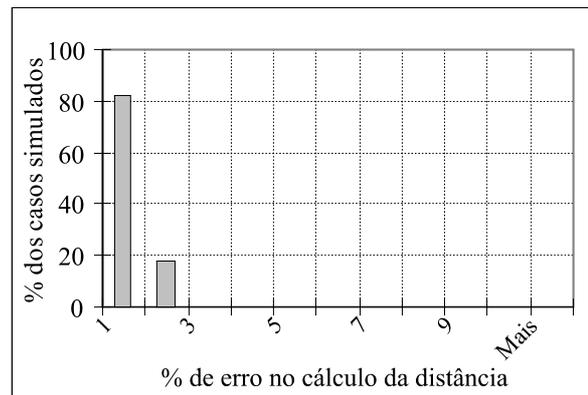


Figura 11: Resposta da função para curtos-circuitos trifásicos

Através das figuras 10 e 11, e da tabela 5, pode-se observar que a resposta da função localização de faltas apresenta uma precisão satisfatória, independente das diversas condições a que foi submetida.

Essa função possui um índice de precisão superior para os curtos-circuitos fase-terra e trifásico, conforme apresentado na tabela 5.

A figura 12 ilustra em detalhes o comportamento dos erros para todos os 175 casos de simulação, bem como a curva de erro acumulado.

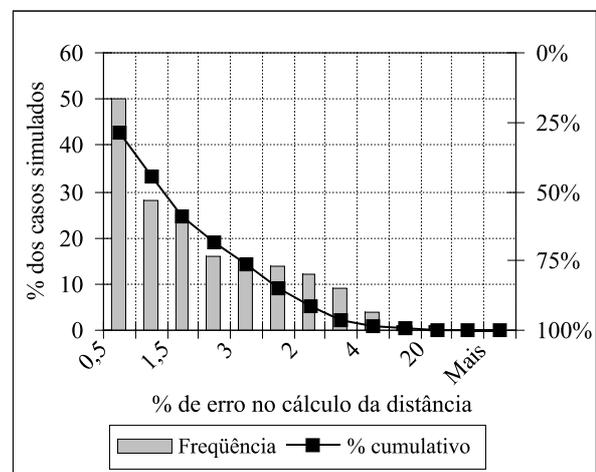


Figura 12: Detalhes dos erros para todos os casos de simulação

Através dessa figura pode-se notar que aproximadamente 90% dos casos se encontram com um nível de erro inferior a 3,5%.

4.1 Implementação da função de localização de faltas

Todos os algoritmos foram implementados em MATLAB para que pudessem ser efetuadas simulações e testes.

A partir dessa implementação foram codificadas rotinas preliminares em ANSI C para posterior implementação no *firmware* do relé.

5 CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados o desenvolvimento e implementação da função de localização de faltas para um relé de distância. Cada um dos algoritmos, que faz parte da função de localização, foi descrito em detalhes, e testado utilizando os casos descritos no item 4. Os resultados obtidos indicam que a função de localização de faltas é robusta, e apresenta um nível de precisão satisfatório.

A próxima etapa do desenvolvimento consiste em implementar essa função no *firmware* do relé, a partir da codificação preliminar feita em ANSI C. A partir dessa implementação pode-se desenvolver uma rotina de testes práticos para se avaliar a precisão da função de localização de faltas em campo.

Uma vez que o relé de distância ainda se encontra em desenvolvimento, os resultados práticos não estão disponíveis.

6 BIBLIOGRAFIA

[1] T. Takagi, Y. Yamakoshi, Y. Baba, K. Uemura, T. Sakagushi, "Development of a New Type Fault Locator Using The One-Terminal Voltage and Current Data", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, n.5, pp. 1316-1323, março de 1981.

[2] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamamura, R. Kondou, T. Matsushima, "A new Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I – Fourier Transformation Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol 101, n. 8, pp. 2892-2898, agosto de 1982.

[3] A.T. Johns, P.J. Moore, R. Whittard New Technique for the Accurate Location of Earth Faults on Transmission Systems. In: IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol 142, n. 2, pp. 309-316, março de 1995.

[4] A. Wisniesisk, "Accurate fault impedance locating algorithm", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol 130, parte c, n. 6, pp. 311-314, 1983.

[5] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamamura, R. Kondou, T. Matsushima, "A new Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I – Fourier Transformation Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol 101, no. 8, pp. 2892-2898, agosto de 1982

[6] Senger, E. C., Reis F., A. F., Manassero Jr., G., Nakagomi, R. M., et al "Desenvolvimento de um Relé Digital de Distância", *VII Seminário Técnico de Proteção e Controle – Junho 2003*, Rio de Janeiro – RJ.

[7] Dong Xinzhou, Ge Yaozhong, "Algorithm for high voltage transmission line fault location using one terminal voltage and two terminal current", *Automation of Electric Power Systems*, 1995, 19(8):47-53

[8] Liang Jun, Meng Zhaoyong, "A new accurate fault location algorithm for two-terminal line", *Automation of Electric Power Systems*, 1998, 21(7):24~27

[9] Oleskovicz, M.; Coury, D.V.; Aggarwal, R.K., "A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks", *IEE – 7th International Conference on Developments in Power System Protection, 2001*, pp. 335 - 338

[10] Zheng Chen; Chengmu Luo; Jinxi Su; Xinrong Wu, "A fault location algorithm for transmission line based on distributed parameter", *IEE 7th International Conference on Developments in Power System Protection, 2001*, pp. 411 - 413

[11] Aurangzeb, M.; Crossley, P.A.; Gale, P., "Fault location using the high frequency travelling waves measured at a single location on a transmission line", *IEE 7th International Conference on Developments in Power System Protection, 2001*, pp. 403 - 406