



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

UTILIZAÇÃO DE DADOS OSCILOGRAFADOS DE CURTO-CIRCUITO PARA A DETERMINAÇÃO DAS IMPEDÂNCIAS EQUIVALENTES DAS FONTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUA INFLUÊNCIA NA LOCALIZAÇÃO DESTAS FALTAS.

Eduardo Gonzaga da Silveira*

Clever Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

Este artigo propõe uma metodologia para o cálculo das impedâncias equivalentes das fontes a partir dos dados de tensão e corrente oscilografados durante o curto-circuito e utilizados para fins de localização de faltas em linhas de transmissão. Inicialmente são estabelecidas as bases teóricas para a obtenção das impedâncias equivalentes sequenciais das fontes terminais, em configuração de linhas simples. É feito um estudo da sensibilidade do algoritmo de localização de faltas de Wiszniewski (1), que é baseado em dados de um terminal, frente à variação das impedâncias equivalentes das fontes e resistência de falta, a partir de casos simulados via ATP. Finalmente, o método é aplicado a casos reais de curto-circuito do sistema elétrico brasileiro, onde se comparam os resultados conseguidos a partir das impedâncias fornecidas pela concessionária, e os obtidos dos próprios dados do curto-circuito analisado.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Impedância de Fonte, Localização de Faltas, Proteção Digital.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com o advento da proteção digital, algoritmos de localização de faltas em LTs têm sido desenvolvidos e utilizados por concessionárias e fabricantes, com o objetivo de melhorar a confiabilidade do sistema, diminuindo o tempo de reparo para faltas permanentes e possibilitando a análise das faltas temporárias. É grande o desafio da tarefa de localização automática de faltas, devido a diversos fatores que podem contribuir para reduzir a precisão, tais como erros de TCs e TPs, erros nos parâmetros de LTs e outros. Além disto, há um fator negativo, associado às necessidades naturais das empresas, que visam custo reduzido na implantação e facilidade de operação dos equipamentos e métodos destinados à tarefa de localização de faltas.

Em alguns sistemas de localização fasorial, normalmente os que utilizam dados de um terminal, existe a necessidade de se obter o valor das impedâncias equivalentes das fontes terminais, que interferem na estimativa do local da falta. Estas impedâncias são na verdade as impedâncias de curto-circuito ou impedâncias equivalentes de Thevenin e, para obtê-las, os engenheiros das concessionárias recorrem habitualmente a bancos de dados ou a programas de curto-circuito. No entanto, devido à natureza dinâmica do sistema elétrico de potência, com entrada e saída de operação de linhas e equipamentos diversos, é esperado que sua topologia, e conseqüentemente, a impedância equivalente de curto-circuito, não permaneçam sempre as mesmas, influenciando de maneira negativa nos resultados fornecidos na localização de faltas.

A equipe do PROTLab/LRC/UFMG vem estudando e implementando algoritmos de localização de faltas para empresas concessionárias brasileiras a mais de três anos. Foi constatado nos estudos realizados que um dos

* **LRC/UFMG – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas**

Av. Antônio Carlos, 6627 - CEP 31.270-901 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - Brasil
Fone/Fax: +55 (031) 3499 4872 - gonzaga@cpdee.ufmg.br - clever@cpdee.ufmg.br

principais fatores que contribuem para que as localizações apresentassem erros significativos era justamente a variação, das impedâncias equivalentes das fontes, quando se utiliza algoritmos de natureza fasorial baseados em dados de apenas um terminal (2). Com o cálculo das impedâncias equivalentes das fontes a partir dos próprios dados de tensão e corrente oscilografados durante o curto-circuito e utilizados para fins de localização de falta, torna-se possível obter dados de entrada mais confiáveis, o que irá refletir de maneira positiva nos resultados alcançados. Os valores das impedâncias das fontes obtidos a partir das oscilografias, também podem ser comparados aos resultantes dos programas de curto-circuito, possibilitando verificar, de forma geral, a dinâmica do sistema elétrico.

Para obtenção das impedâncias das fontes e localização de faltas é necessário um pré-processamento adequado dos dados de entrada, de forma a reduzir ao máximo os erros nas estimativas. A Figura 1 apresenta as etapas básicas do programa desenvolvido, mostrando as principais fases a serem executadas. O processo tem início com a leitura dos dados de entrada provenientes dos terminais local e remoto da linha de transmissão. Segue o pré-condicionamento destes sinais através da aplicação de um filtro passa-baixas, adequado ao filtro estimador utilizado na fase de estimação dos fasores associados à fundamental. Em seguida, determina-se o instante de ocorrência e a identificação da falta, de modo a permitir uma distinção dos períodos pré e pós-falta e o tipo de curto-circuito. Finalmente segue a aplicação do algoritmo propriamente dito para cálculo das impedâncias equivalentes e a estimativa da distância até o ponto de falta.

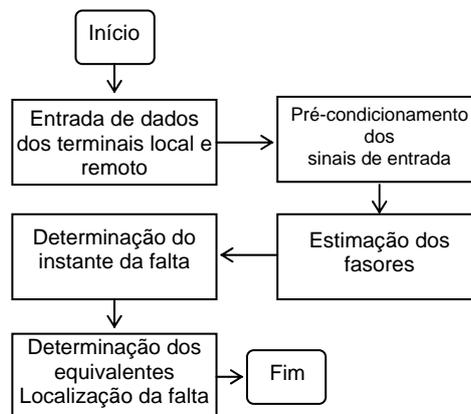


FIGURA 1 – Algoritmo para determinação das impedâncias equivalentes e localização de faltas

A Figura 2(a) mostra o gráfico relativo a um evento registrado por um RDP, onde se têm os valores instantâneos das tensões e correntes em um terminal de uma linha de transmissão. A Figura 2(b) mostra o efeito da aplicação do filtro passa-baixas, executada na fase de pré-processamento, nas ondas da Figura 2, onde se utilizou um filtro digital de Butterworth de 2ª ordem, com frequência de corte em 100 Hz.

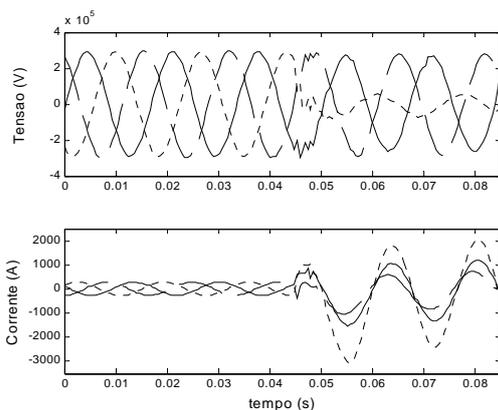


FIGURA 2(a) – Ondas de tensão e corrente de entrada

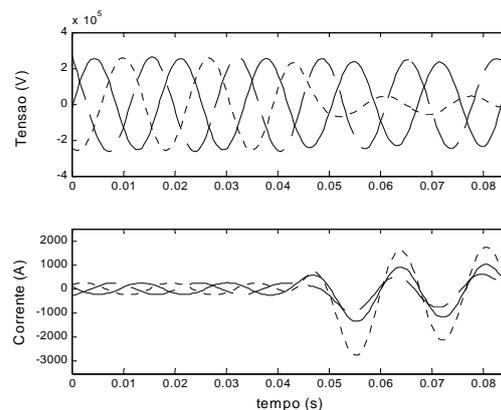


FIGURA 2(b) – Ondas de tensão e corrente filtradas

Nas Figuras 3(a) e 3(b) tem-se os módulo e ângulos dos fasores estimados (3, 4) a partir das ondas da Figura 2(b).

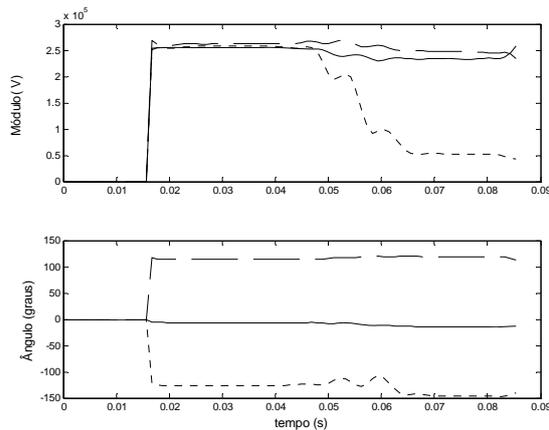


FIGURA 3(a) – Módulos e ângulos de fasores estimados das ondas de tensão

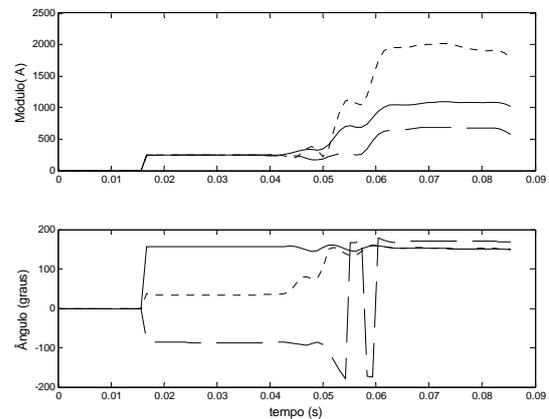


FIGURA 3(b) – Módulos e ângulos de fasores estimados das ondas de corrente

2.0 - CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS DAS FONTES

Algoritmos de localização de faltas, notadamente os que utilizam dados de um terminal, podem necessitar conforme sua formulação, dos valores das impedâncias das fontes equivalentes. Este dado, muitas vezes, é citado como um dos pontos que podem trazer prejuízo à precisão dos algoritmos, devido à dificuldade de sua obtenção, em função da topologia do circuito que muda ao longo do tempo. A solução normalmente adotada é a utilização de programas de curto-circuito, que fornecem a impedância equivalente do sistema elétrico vista dos terminais da linha de transmissão.

O método proposto busca representar o equivalente Thevenin a partir das extremidades da linha, através das ondas de tensões e correntes registradas. Pode-se assim considerar as condições da topologia da rede e carga, fornecendo as impedâncias equivalentes no momento do curto-circuito, que refletem as condições reais do sistema no momento da falta.

Considere a Figura 4, onde as barras terminais pertencem a sistemas elétricos diferentes. A única interligação entre os subsistemas A e B é a linha de transmissão SR.

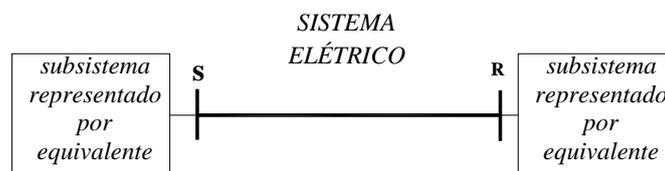


FIGURA 4 – Sistema elétrico

O sistema elétrico pode ser representado conforme o diagrama unifilar da Figura 5, sendo Z_S e Z_R as impedâncias de entrada vistas das barras S e R.



FIGURA 5 – Equivalente de um sistema a partir das barras S e R

Na determinação das impedâncias equivalentes, utilizam-se a técnica das componentes simétricas e o teorema da superposição. Desta forma, decompõe-se o circuito em redes de seqüência, conforme o tipo de falta ocorrido. Como exemplo, considere a linha de transmissão da Figura 5, com um dado fluxo de carga. A rede de

seqüências correspondente é mostrada na Figura 6(a). Na ocorrência de uma falta fase-terra em um ponto da linha, obtém-se o circuito em falta conforme Figura 6(b). Utilizando o teorema da superposição, chega-se ao circuito superposto da Figura 6(c), que pode ser obtido através das redes pré-falta e pós falta.

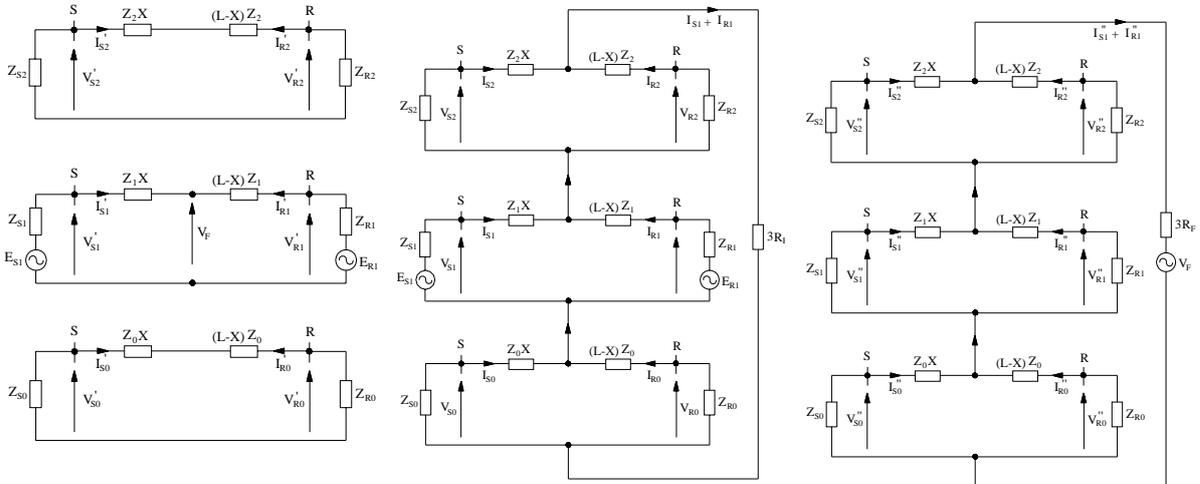


FIGURA 6(a) – Circuito pré-falta

FIGURA 6(b) – Circuito em falta

FIGURA 6(c) – Circuito superposto

As impedâncias das fontes podem ser obtidas a partir do circuito superposto, conforme pode ser verificado na figura 6(c), sendo dadas por

$$Z_{S1} = -\frac{V_{S1} - V'_{S1}}{I_{S1} - I'_{S1}} = -\frac{V''_{S1}}{I''_{S1}} \quad (1)$$

$$Z_{S0} = -\frac{V_{S0} - V'_{S0}}{I_{S0} - I'_{S0}} = -\frac{V''_{S0}}{I''_{S0}} \quad (2)$$

$$Z_{R1} = -\frac{V_{R1} - V'_{R1}}{I_{R1} - I'_{R1}} = -\frac{V''_{R1}}{I''_{R1}} \quad (3)$$

$$Z_{R0} = -\frac{V_{R0} - V'_{R0}}{I_{R0} - I'_{R0}} = -\frac{V''_{R0}}{I''_{R0}} \quad (4)$$

A impedância de seqüência negativa é normalmente considerada igual à positiva. Observe que a impedância de seqüência está atrelada ao tipo de falta. Assim, um curto-circuito fase-terra fornece as impedâncias de seqüência positiva e zero das fontes, ao passo que um trifásico resultará apenas na de seqüência positiva.

3.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Para análise de desempenho dos algoritmos de localização e cálculo das impedâncias das fontes foram utilizados dados reais de faltas, registrados em linhas do sistema elétrico brasileiro, e simulados.

As faltas reais foram aplicadas aos algoritmos para avaliação do desempenho em condições reais de operação. O registro foi feito através de RDP's com freqüência de amostragem de 1920 Hz, nos dois terminais da linha de transmissão, não estando os dados sincronizados. Os valores das impedâncias das fontes equivalentes obtidas através de programas de curto-circuito, assim como as distâncias de ocorrência, foram fornecidos pela concessionária, de forma a se comparar com os resultados dos algoritmos apresentados.

Nas faltas simuladas, considerou-se uma linha de transmissão trifásica de 138 kV e 200 km com geometria mostrada na Figura 7. A fase utilizada entre as tensões das fontes foi de 15° e os valores dos equivalentes terminais e das impedâncias de seqüência da linha, supondo transposição perfeita, encontram-se nas Tabelas 1 e 2 respectivamente. Foram simulados diversos casos, variando-se a distância até o ponto de falta, a resistência de falta e a capacidade das fontes equivalentes.

O erro obtido pelos algoritmos é expresso em função do comprimento total da linha, dado por

$$e(\%) = \frac{(\text{local estimado} - \text{local real}) \times 100}{\text{comprimento da linha}} \quad (5)$$

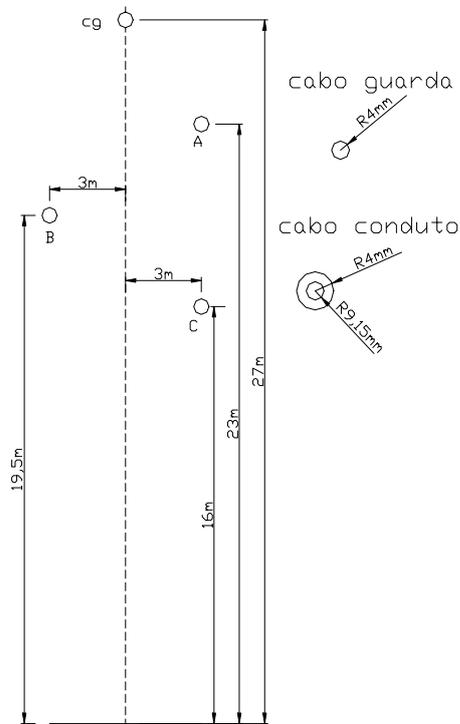


FIGURA 7 – Geometria da linha de 138 kV

TABELA 1 – Dados das fontes utilizadas nas faltas simuladas

Terminal	Seqüência Positiva (ohms)	Seqüência Zero (ohms)
Local	0,635+j132,7	0,444+j93,11
Remoto	0,635+j132,7	0,444+j93,11

TABELA 2 – Dados das impedâncias da linha utilizada nas faltas simuladas

Seqüência Positiva			Seqüência Zero		
r_1 (ohm/km)	x_1 (ohm/km)	C_1 (nF/km)	r_0 (ohm/km)	x_0 (ohm/km)	C_0 (nF/km)
0,175	0,6997	8,45	0,46240 0	1,8	5,44

As Figuras 8(a) e 8(b) mostram a evolução do valor estimado das resistências e reatâncias da fonte para uma falta AT, simulada a 80 km do terminal S.

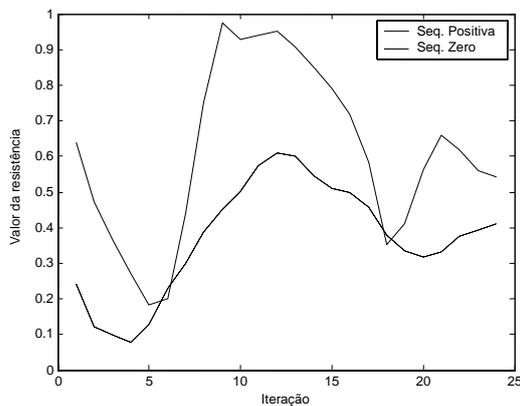


FIGURA 8(a) – Evolução da resistência estimada

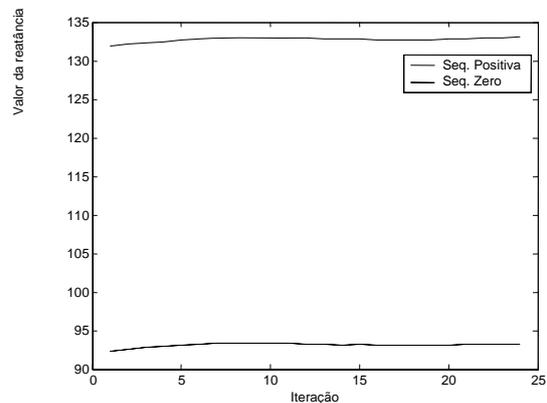


FIGURA 8(b) - Evolução da reatância estimada

Observa-se que a estimativa das impedâncias das fontes possui uma boa precisão, sendo possível à determinação dos valores das impedâncias das fontes no momento do curto-circuito.

As Figuras 9(a) e 9(b) mostram os erros obtidos, a partir do terminal S, na aplicação dos algoritmos para faltas simuladas fase-terra com resistência de falta de 20 e 100 ohms respectivamente, para as fontes com mesma capacidade de curto-circuito ($SIR = 1$). Foram consideradas duas situações para aplicação do algoritmo de Wiszniewski, em relação ao valor de entrada das impedâncias das fontes: a primeira desprezando-as e a outra com as impedâncias calculadas a partir dos dados de entrada. Observam-se para a resistência de falta de 20 ohms, os erros possuem a mesma ordem de grandeza, tornando maiores quando a resistência passa a 100

ohms e não se considera a impedância da fonte na aplicação do algoritmo. Por utilizar apenas um terminal, à medida que a falta se aproxima do terminal remoto, os erros aumentam.

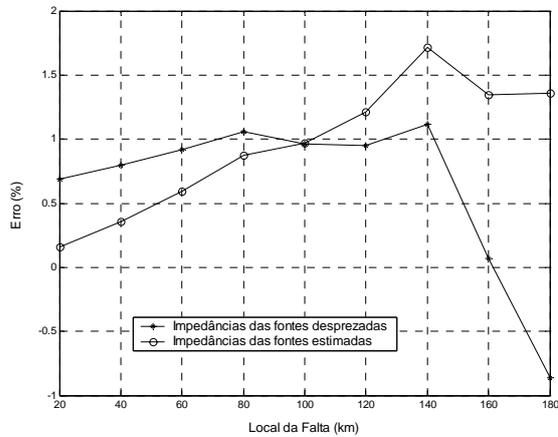


FIGURA 9(a) – Erros de localização para faltas AT
SIR = 1 e $R_F = 20$ ohms

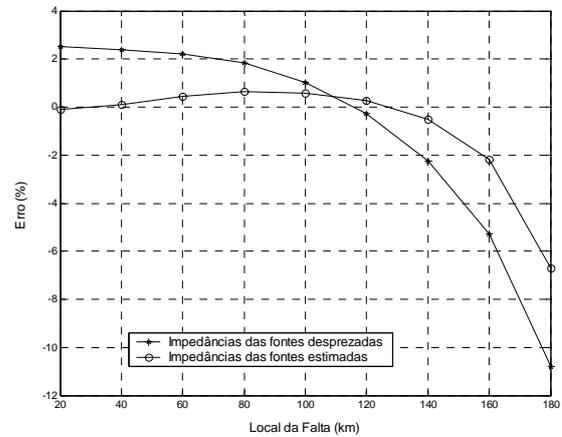


FIGURA 9(b) – Erros de localização para faltas AT
SIR = 1 e $R_F = 100$ ohms

Para as Figuras 10(a) e 10(b), alterou-se a capacidade de curto-circuito da fonte local (terminal S) para um valor dez vezes maior ($SIR = 10$). Os erros aumentaram consideravelmente ao não se fornecer as impedâncias das fontes, tornando-se maiores para as faltas próximas a extremidade oposta.

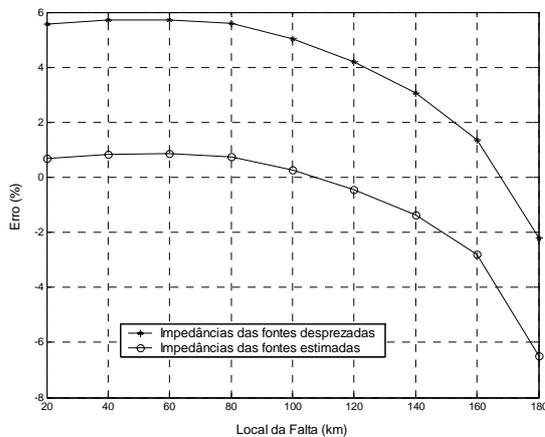


FIGURA 10(a) – Erros de localização para faltas AT
SIR = 10 e $R_F = 20$ ohms

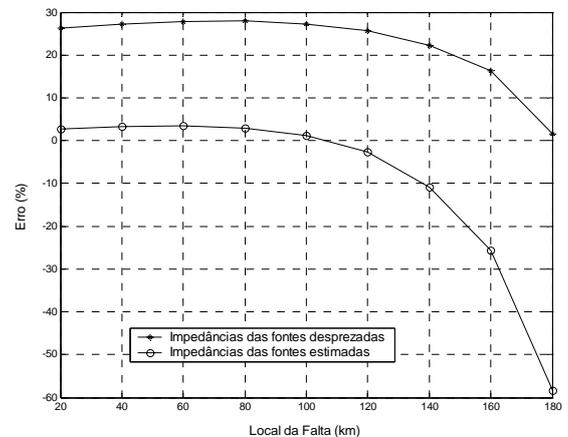


FIGURA 10(b) – Erros de localização para faltas AT
SIR = 10 e $R_F = 100$ ohms

Na Tabela 3 apresentam-se valores de impedâncias obtidos de casos reais de curto-circuito, com a aplicação dos algoritmos e os fornecidos pela concessionária. Observam-se diferenças para todos os casos, até mesmo para os calculados para faltas na mesma linha, ocorridas em datas diferentes, mostrando que as mudanças no sistema elétrico efetivamente se refletem nos equivalentes terminais da linha de transmissão.

Na Tabela 4 tem-se os resultados da aplicação de casos reais de faltas ao algoritmo de Wiszniewski em três situações: desprezando a impedância da fonte, com os valores fornecidos pela concessionária e finalmente estimando a impedância a partir dos dados de entrada. A resistência de falta foi obtida conforme proposto por Izone & Clever (5). A localização foi feita a partir do terminal cuja fonte apresentou menor impedância, conforme Tabela 3. Observa-se que não há diferença significativa no local estimado, à medida que se altera o valor atribuído a impedância da fonte. Isto se deve ao fato de as resistências de falta apresentarem baixos valores, tornando pequeno o efeito das impedâncias das fontes e a correção feita pelo algoritmo de Wiszniewski para cálculo da distância.

TABELA 3 – Impedâncias das fontes para faltas reais

LT	Extensão (km)	Falta	Impedância Fornecida Pela Concessionária				Impedância Estimada			
			Terminal S		Terminal R		Terminal S		Terminal R	
			Z ₀	Z ₁	Z ₀	Z ₁	Z ₀	Z ₁	Z ₀	Z ₁
1	74,4	AT	4,1+j33,6	4,0+j34,1	2,7+j39,4	6,3+j53,8	4,7+j39,5	4,6+j40,2	3,9+j37,8	7,1+j53,8
		BT					9,7+j38,1	5,6+j37,5	1,4+j38,4	3,7+j64,5
2	356,3	AT	2,3+j25,4	0,9+j20,1	2,2+j26,0	1,8+j31,4	4,7+j29,7	1,1+j34,0	0,2+j34,2	0,1+j56,8
3	219,2	BT	2,2+j26,0	1,8+j31,4	7,3+j67,2	3+j48,7	9,5+j95,9	6,1+j96,5	6,6+j32,7	7,3+j50,0

TABELA 4 – Localização para casos reais de faltas

LT	Extensão (km)	Falta	R _F (ohms)	Local da Falta (km)	Local Estimado (km)		
					Z _{FORNTE} (Desprezada)	Z _{FORNTE} (Concessionária)	Z _{FORNTE} (Estimada)
1	74,4	AT	4,3	60	69,5	69,7	68,5
		BT	3,8	54	58,9	59,1	58,2
2	356,3	AT	18,2	127	126,9	126,7	127,0
3	219,2	BT	1,3	1,2	0,0	0,0	0,0

4 - CONCLUSÕES

Os estudos realizados mostraram que o método para estimação das impedâncias equivalentes das fontes é viável, sendo de fácil implementação e de boa precisão, o que pode ser visto pela aplicação aos casos simulados. O método é adequado para aplicação em linhas que não têm outra ligação (impedância de transferência) entre os terminais local e remoto ou que esta ligação tenha impedância elevada em relação à linha.

Os equivalentes obtidos dos casos reais foram comparados com os fornecidos pela concessionária, podendo-se verificar diferenças entre os valores, algumas elevadas. Mesmo para faltas na mesma linha, ocorrendo em dias diferentes, obtêm-se valores estimados distintos das impedâncias das fontes, devido a mudança da topologia da rede.

Nas localizações de falta, utilizou-se o algoritmo de Wiszniewski, que possui dependência das impedâncias das fontes em sua formulação. Em faltas simuladas, para verificar a influência nos erros, aplicou-se os algoritmos, sem fornecer as impedâncias das fontes e calculando-as dos próprios dados de entrada, variando também a capacidade de curto-circuito das fontes e o valor da resistência de falta. Verificaram-se as maiores diferenças para resistência de falta elevada e fonte fraca, com alta impedância. Os erros tornaram-se maiores para as faltas próximas ao terminal remoto, o que normalmente é uma característica dos localizadores que utilizam dados de um terminal.

Nos casos reais, não se observou grandes diferenças nos erros entre as situações propostas. As faltas ocorridas, com baixo valor de resistência de faltas, não destacaram de forma importante o papel das impedâncias das fontes e o algoritmo de Wiszniewski.

Com a possibilidade de se estimar a impedância das fontes a partir dos dados de falta, que são utilizados para fins de localização, agregam-se mais informações do sistema elétrico, podendo-se melhorar a precisão de localizadores, assim como desenvolver aplicações em outras áreas de proteção.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WISZNIEWSKI, A. How to Reduce Errors of Distance Fault Location Algorithms. IEEE Trans. PAS-100, pp. 4815-4820, 1981.
- (2) PEREIRA, C., SILVEIRA, E.G. Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Dados de Tensão e Corrente de Um Terminal. XVI SNPTEE 2001.
- (3) C. PEREIRA, F. C. CRUZ. Análise do Comportamento Estático e Dinâmico dos Filtros Digitais de Mínimos Quadrados na Proteção de Linhas de Transmissão, XV SNPTEE 1999.
- (4) C. PEREIRA, F. C. CRUZ, S. Visacro 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) PEREIRA, I. H. Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão com Informações dos Dois Terminais. Dissertação de Mestrado, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 10/2004.