



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC 29  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO V**

### **GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

#### **LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE TRÊS TERMINAIS, ATRAVÉS DA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES, UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS**

**Marcel Fernando da Costa Parentoni\***

**Frederico Oliveira Assunção**

**Paulo Márcio da Silveira**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é propor um método para a localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) de três terminais que utiliza dados de apenas dois terminais, e não dos três como é convencionalmente feito. O fato de se utilizar dois ao invés de três terminais representa uma grande economia de equipamentos de monitoração e comunicação de dados entre os terminais.

No decorrer do trabalho são abordadas as mais diversas condições variando os parâmetros das linhas de transmissão do "circuito T", com o intuito de simular as piores situações para a execução do método proposto. Os resultados obtidos são avaliados com base no valor real da distância de falta.

Ao final do trabalho, será traçado um comparativo entre o método proposto, que utiliza dados de dois terminais, e o método convencional, que utiliza dados dos três terminais. Este comparativo, além de levantar as vantagens e as desvantagens da utilização do método proposto frente ao método convencional, explora também a questão dos custos envolvidos, bem como a questão da exatidão dos resultados alcançados por cada método.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Localização de Faltas, Circuitos T, Ondas Viajantes, Transformada Wavelet.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

Ultimamente, tem se observado na literatura especializada, tanto em cenário nacional quanto internacional, que a questão da localização de faltas em sistemas de transmissão com três terminais, chamados geralmente de "circuitos T", é resolvida a partir da utilização de registros ns três pontas.

Ciente desta tendência, este trabalho propõe um método eficaz de localização de faltas através da monitoração de apenas dois dos terminais. O algoritmo de localização desenvolvido, para dar suporte a este método, necessita de técnicas de pré-processamento de sinais, para adequar o sinal medido à aplicação da teoria de ondas viajantes. Este pré-processamento é conseguido através da transformação modal, que desacopla os sinais em modos aéreos e terra, e da transformada wavelet, que isola as partes de interesse dos sinais.

A possibilidade de utilização de dados de apenas dois terminais foi observada tanto durante a fase de desenvolvimento do método, quanto durante a fase de realização de simulações para assegurar a estimação correta da localização de falta além da identificação do ramo sob falta.

Inicialmente, o algoritmo de localização compara os resultados obtidos em cada um dos dois terminais de medição. A partir desta análise, é possível identificar em qual dos três ramos do sistema a falta ocorreu. Este passo inicial é chamado de pré-localização da falta.

Tendo identificado o ramo sob falta, o algoritmo passa para a rotina de estimação da posição de falta. A estimação utiliza apenas os dados de um terminal, pré-definido também, no processo de identificação do ramo sob falta.

## 2.0 - LOCALIZAÇÃO DE FALTAS ATRAVÉS DA TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES

Quando da ocorrência de um curto-circuito (falta), as conseqüentes mudanças na energia armazenada produzem ondas viajantes. Estas ondas viajam do ponto de falta, em ambos sentidos, até os terminais da LT. Quando a onda encontra uma descontinuidade de impedância (fontes, transformadores, etc.) ela é refletida e retorna ao ponto de defeito, onde ocorre uma nova reflexão, e assim sucessivamente até desaparecerem devido à atenuação (1).

Diversos trabalhos utilizam a teoria das ondas viajantes para a execução da localização de faltas em LTs (2, 3, 4). Estes trabalhos utilizam o diagrama de Lattice para o auxílio no entendimento da propagação das ondas viajantes na LT. A figura 1 traz o diagrama correspondente a uma falta fase-terra.

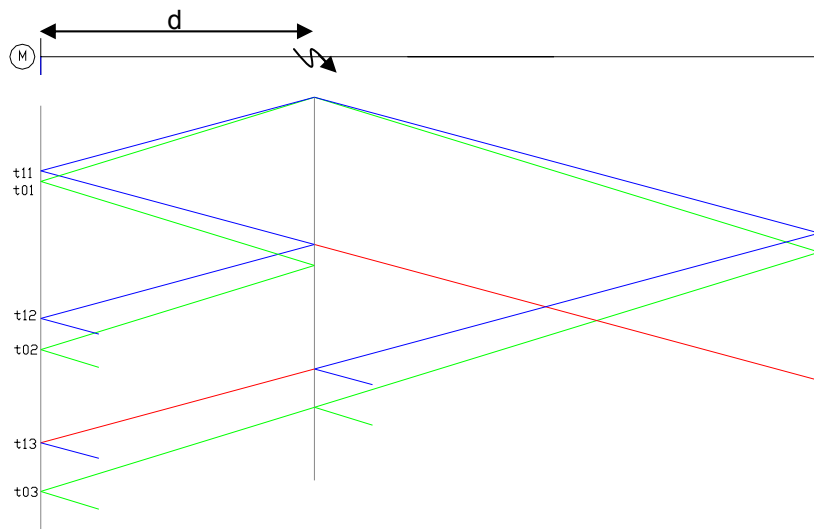


FIGURA 1 – Diagrama de Lattice.

Como pode ser observado, existem dois modos de propagação, aéreo e terra, representados pelos traços azuis e verdes respectivamente. As ondas refratadas são representadas pelos traços vermelhos. Os instantes de chegada das ondas no terminal de monitoração estão também indicados no diagrama.

No sinal registrado no terminal de monitoração, aplica-se inicialmente a transformação modal seguida da decomposição wavelet. Desta maneira, os instantes de reflexão podem ser identificados com exatidão. Assim sendo, e tendo-se conhecimento das velocidades de propagação das ondas viajantes, pode-se determinar a distância de falta. Os itens subseqüentes explicitam os procedimentos de obtenção das velocidades de propagação e de cálculo da distância da falta.

### 2.1 Velocidade de Propagação

As ondas viajantes se propagam no sistema elétrico com uma velocidade definida pelos parâmetros da LT, da seguinte forma (5):

$$v_m = \frac{\omega}{\text{Im}\left(\sqrt{(R_m + j\omega L_m) \cdot j\omega C_m}\right)} \quad (1)$$

onde  $m$  indica o modo de propagação,  $L$  e  $C$  são os valores de indutância e capacitância por unidade de comprimento da LT.

## 2.2 Cálculo da Distância de Falta

Observa-se, na figura 1, que a onda viajante de modo aéreo demora o intervalo de tempo  $t_{12} - t_{11}$  para percorrer duas vezes a distância de falta. Desta forma, sabendo-se a velocidade com a qual a onda viaja, a utilização da expressão (2) permite localizar a falta em uma LT.

$$d = \frac{v_1(t_{12} - t_{11})}{2} \quad (2)$$

## 3.0 - LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS COM TRÊS TERMINAIS UTILIZANDO DADOS DE DOIS TERMINAIS

O método proposto tem por meta localizar a falta em qualquer ponto de um sistema com três terminais, alocando-se medidores em apenas dois terminais. A figura 2 ilustra este tipo de sistema, que também foi utilizado para as simulações computacionais realizadas neste trabalho.

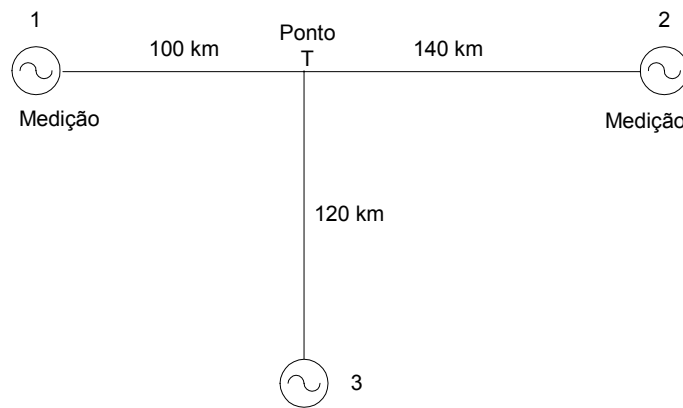


FIGURA 2 – Sistema Elétrico.

Existem duas etapas para a implementação do método: (i) identificação do ramo sob falta; e (ii) localização da falta.

### 3.1 Identificação do Ramo sob Falta

Nesta etapa, deseja-se apenas saber qual dos três ramos do sistema elétrico sofreu a falta. Para tanto, utiliza-se o resultado obtido pelo cálculo da distância preliminar, descrito na Seção 2.0, na qual a distância de falta é calculada com base no intervalo de tempo entre a primeira reflexão de modo aéreo e a primeira reflexão de modo terra.

Desta maneira, definindo os terminais 1 e 2 da figura 2 como pontos de medição de tensão, as possibilidades existentes para a identificação do ramo sob falta são indicadas na tabela 1.

Tabela 1 – Identificação do ramos sob falta.

Situação	Condição de Teste	Veredicto
1	$d_{pre_1} < l_1$ e $d_{pre_2} > l_2$	Falta no ramo 1
2	$d_{pre_1} > l_1$ e $d_{pre_2} < l_2$	Falta no ramo 2
3	$d_{pre_1} > l_1$ e $d_{pre_2} > l_2$	Falta no ramo 3

Denomina-se  $l_n$  o comprimento do ramo  $n$ , cujo terminal está sendo monitorado. Qualquer situação de falta fará parte de uma das três condições mostradas na tabela 1. Através do diagrama de Lattice, as três situações podem ser visualizadas com mais critério. A título de exemplo, a figura 3 ilustra a situação 3.

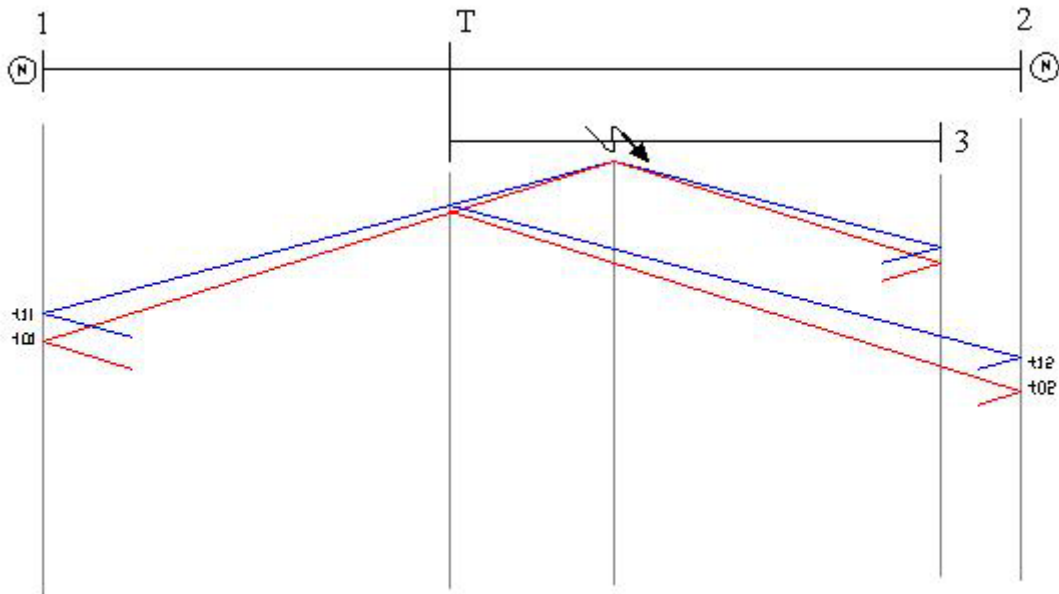


Figura 3 – Diagrama de Lattice referente a situação 3.

Observa-se na figura 3 que, para a falta no ramo 3, os intervalos de tempo medidos nos terminais 1 e 2, resultariam em distâncias preliminares maiores do que os comprimentos dos ramos 1 e 2, indicando que a falta ocorre no ramo 3.

### 3.2 Localização da Falta

Uma vez identificado o ramo sob falta, o algoritmo utiliza apenas os registros de tensão de um dos dois terminais. De acordo com a tabela 1, para a situação 1, o algoritmo de localização utiliza os dados do terminal 1. Analogamente, para a situação 2, os dados do terminal 2.

Por fim, quando a falta ocorre no ramo cujo terminal não está sendo monitorado o algoritmo acessa uma subrotina de comparação de amplitude entre os sinais de reflexão das ondas viajantes dos terminais 1 e 2. É escolhido o terminal que apresente a maior amplitude ou a menor atenuação. Essa escolha reduz a possibilidade de erros em decorrência de perda de informação causada por atenuação.

De posse dos registros das reflexões das ondas viajantes no terminal escolhido o algoritmo passa a calcular a distância da falta. O algoritmo de cálculo foi implementado prevendo-se ramos de transmissão de diferentes comprimentos, bem como diferentes parâmetros de modelagem. Nessa última situação irão existir diferentes velocidades de propagação para cada ramo do circuito T. As expressões (3) e (4) gerenciam o cálculo de distância da falta, para a primeira e para a segunda metade de cada ramo da LT, respectivamente.

$$d = \frac{\Delta t_n \cdot v_h}{2} \quad (3)$$

$$d = l_h - \frac{\Delta t_n \cdot v_h}{2} \quad (4)$$

sendo  $n$  o terminal de monitoração escolhido e  $h$  o ramo sob falta.

No caso da falta ocorrer no ramo 3, a identificação de qual metade do ramo ela acontece é feita levando em consideração as diferentes velocidades de propagação dos ramos, uma vez que a onda viaja por dois ramos diferentes antes de chegar a um terminal de medição. Em outras palavras, inicialmente a onda percorre um trecho do ramo 3 com velocidade definida pelos parâmetros do ramo 3. Chegando ao ponto T, a onda é refratada e percorre o ramo monitorado com velocidade definida pelos seus parâmetros, até chegar ao terminal de monitoração.

Para um melhor entendimento deste primeiro método proposto um fluxograma é apresentado na Figura 4.

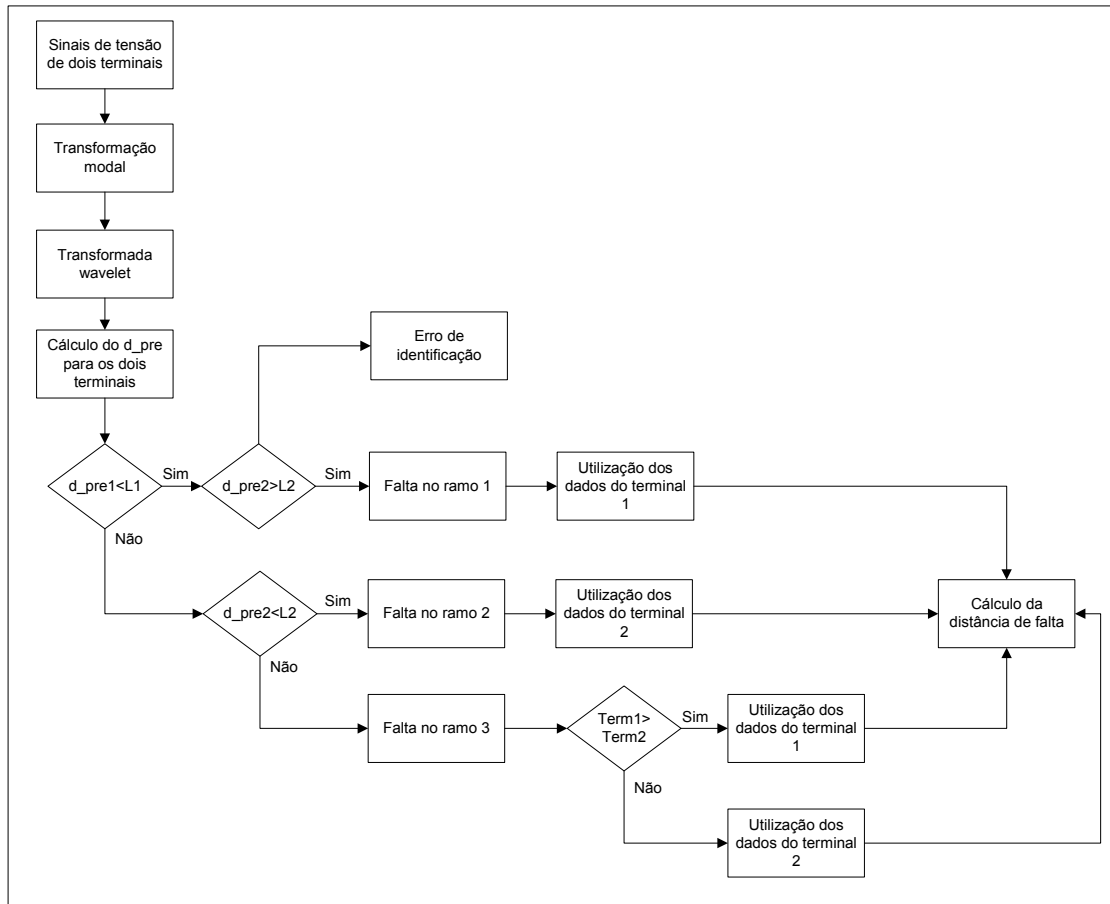


Figura 4 – Fluxograma do método proposto.

#### 4.0 - RESULTADOS – AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Para se obter uma avaliação confiável do desempenho do método proposto foram realizadas simulações computacionais utilizando o software Matlab. O circuito elétrico foi modelado com base no circuito ilustrado pela figura 2. Para a avaliação do método proposto, são alocados medidores de tensão apenas nos terminais 1 e 2 do circuito. A tensão base do sistema é 138 kV.

De posse desta modelagem, foi simulado um grande número de situações. No entanto, para efeitos práticos e comparativos, a tabela 2 apenas nove situações de interesse.

Tabela 2 – Resultados do método proposto

Ramo sob falta real	Distância de falta real [km]	$d_{pre_1}$ [km]	$d_{pre_2}$ [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	20	19,46	227,60	1	19,43	0,57
1	80	84,35	155,72	1	79,72	0,28
1	95	97,32	142,74	1	94,09	0,91
2	40	194,65	38,93	2	39,70	0,21
2	80	155,72	84,35	2	80,87	0,62

2	135	103,81	136,25	2	134,09	0,65
3	20	116,79	162,21	3	19,43	0,48
3	80	181,67	227,09	3	81,30	0,25
3	5	103,81	149,23	3	114,09	0,76

Observa-se na tabela 2 que todos os ramos foram identificados corretamente. Até mesmo para as faltas localizadas a 5 km do ponto T, o algoritmo se mostrou eficiente e se comportou de maneira segura. Observa-se ainda que os erros obtidos são pequenos e aceitáveis, sendo o maior valor encontrado igual a 0,91 %, o que, em valores absolutos, implica uma distância menor que 1 km.

Com a intenção de avaliar a robustez do método proposto, foram analisadas situações nas quais foram variados os comprimentos e a homogeneidade dos ramos. Para todas as situações o método proposto apresentou um desempenho satisfatório, analogamente aos resultados apresentados na tabela 2.

Com o conhecimento do desempenho do método sob diversas condições, foi possível simular as situações perante às quais o método proposto se comporta da pior maneira possível. Estas condições são denominadas de piores situações, dentre as quais pode-se destacar:

1. os comprimentos dos ramos 1, 2 e 3 são, respectivamente, 100, 140 e 120 km, com falta simulada no ramo 1 a uma distância de 98 km;
2. idem ao anterior porém com falta a 99 km.

Nota-se que as piores situações ocorrem quando a falta se encontra muito próxima ao ponto T. Este fato se deve à imprecisão na determinação da velocidade de propagação de modo terra, o que dificulta o cálculo da distância preliminar.

Os resultados obtidos pelas simulações das duas situações citadas acima são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados para as piores situações

Situação	$d_{pre_1}$ [km]	$d_{pre_2}$ [km]	Ramo sob falta identificado	Distância de falta calculada [km]	Erro percentual [%]
1	97,32	149,23	1	98,31	0,31
2	103,80	142,74	3	-	-

Para a falta situada a 2 km do ponto T (situação 1) o algoritmo identificou corretamente o ramo e calculou com boa exatidão o local da falta.

No entanto, quando foi simulada uma falta a 1 km de distância do ponto T (situação 2), o algoritmo identificou erroneamente o ramo 3, pois  $d_{pre_1} > l_1$  e  $d_{pre_2} > l_2$ . Ficou assim impossível calcular a distância de falta, uma vez que a segunda reflexão foi mascarada devido à insuficiência da taxa de amostragem.

O método convencional (medição em três terminais) (6) é capaz de identificar corretamente o ramo sob falta para esta mesma situação, apesar das magnitudes dos sinais se aproximarem bastante. No entanto, essa abordagem também não consegue obter o valor da distância em razão do mesmo problema de insuficiência da taxa de amostragem.

## 5.0 - COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS PROPOSTO E CONVENCIONAL

Fica evidente que a aplicação do método proposto para a localização de faltas em sistemas com três terminais é pertinente, haja vista uma economia de um terço dos equipamentos de monitoração. Além disso, os resultados das simulações computacionais mostraram bom desempenho quando comparados com os resultados obtidos pelo método convencional.

A desvantagem, até então, do método proposto diz respeito àquelas faltas que ocorrem muito próximas ao ponto T. Como mostrado, o processo de identificação responde perfeitamente para faltas situadas a até 2 km do ponto T. Para faltas mais próximas o algoritmo proposto poderá identificar erroneamente o ramo sob falta. No entanto, cabe enfatizar que tal limitação pode ser contornada com taxas de amostragem mais elevadas.

É importante observar que a exatidão obtida para os três métodos foi satisfatória. Dessa maneira, uma falta pode ser localizada em um sistema de três terminais, com aceitável exatidão, independente do método escolhido.

O que diferencia os métodos entre si é o processo de identificação do ramo sob falta. Para todos os casos simulados, o método convencional conseguiu identificar corretamente o ramo sob falta. No caso do método proposto nem toda identificação foi bem sucedida. Em algumas situações bem particulares, os algoritmos se confundiram e acabaram por identificar o ramo de forma incorreta, conduzindo, portanto, a valores errados de distância de falta. Cabe enfatizar que tais situações representam uma parcela reduzida das situações possíveis, ou seja, a probabilidade de ocorrência das mesmas é bem pequena, como já comentado.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para a localização de faltas em circuitos T que utiliza dados de apenas dois terminais do circuito. O método proposto foi colocado à prova por intermédio de simulações computacionais. Foram realizadas também comparações entre os resultados obtidos com os valores reais de localização da falta, bem como com os resultados obtidos através da utilização do método convencional.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que, para efetuar a localização de faltas em circuitos T, a utilização dos dados dos três terminais é desnecessária, visto haver redundância entre eles. Tal constatação resulta em economia de equipamento na instalação de um sistema localizador de faltas em circuitos T.

Como comentado na seção 5, o método proposto possui vantagens e desvantagens. É necessário avaliar sua adequação para cada tipo de aplicação, ou seja, a opção de se utilizar o método proposto, ao invés do convencional, deve ser feita com base nas necessidades e disponibilidades econômicas e técnicas.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BHUNIA, S.; ROY, K.; SEGURA, J. A novel Wavelet Transform Based Transient Current Analysis for Fault Detection and Localization. DAC2002, June 10-14, 2002, New Orleans, Louisiana, USA.
- (2) SILVEIRA, P. M. Identificação e Localização de Faltas Utilizando Análise por Decomposição Wavelet para Relés de Linhas de Transmissão. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Agosto, 2001.
- (3) SILVEIRA, P. M., SEARA, R., ZÜRN, H. H.. Localização de Faltas por Ondas Viajantes – Uma Abordagem Baseada em Decomposição Wavelet. XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, 2001.
- (4) MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. Fault Location Using Wavelets. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998.
- (5) FUCHS, R. D. Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), Itajubá, 1973.
- (6) EVRENOSOGLU, C. Y.; ABUR, A. *Travelling Wave Based Fault Location for Teed Circuits*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Marcel Fernando da Costa Parentoni** nasceu em Itapira, Brasil, em 12 de abril de 1982. Engenheiro Eletricista e Mestre pela Universidade Federal de Itajubá em 2004 e 2006, respectivamente. Atualmente cursa doutorado na mesma instituição. Desenvolveu pesquisas nas seguintes áreas: cargas não-lineares; harmônicos; processamento de sinais; manutenção de linhas de transmissão; localização de faltas em linhas de transmissão. Suas principais áreas de interesse são qualidade da energia elétrica, processamento de sinais e proteção de sistemas elétricos.

**Frederico Oliveira Assunção** nasceu em Belo Horizonte, Brasil, em 15 de maio de 1980. Graduado e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá em 2003 e 2006, respectivamente. Atualmente cursa doutorado na mesma instituição. Trabalhou por dois anos com manutenção preditiva de motores de indução. Os resultados da aplicação da técnica MCSA foram publicados em diversas oportunidades. Suas principais áreas de interesse são processamento de sinais e proteção de sistemas elétricos. Nesta última realiza diversos trabalhos principalmente na localização de faltas em linhas de transmissão utilizando Unidades de Medição Fasorial (PMU).

**Paulo Márcio da Silveira** nasceu em Itajubá, MG., em 1960. Engenheiro Elétrico e Mestre pela EFEI em 1984 e 1991, respectivamente. Trabalhou na Balteau em 1985-1989. Desde 1992 é Professor do Instituto de Engenharia Elétrica da EFEI, atualmente Universidade Federal de Itajubá. Recebeu o título de Doutor pela UFSC em 2001. Áreas de atuação: proteção de sistemas elétricos, qualidade da energia elétrica e processamento de sinais para instrumentação.