

# Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Localização de Defeitos em Cabos Subterrâneos de Baixa Tensão

André N. de Souza, Paulo S. Silva, Juliano M. Gonçalves, Daniel B. Santos,  
Anderson M. Oltremari e Maria G. Zago, Paulo R. Aguiar Wagner Pereira e Sunny Jonathan  
LSisPoTi – FEB - UNESP - Bauru AES-Eletropaulo

**Resumo** - Para análise de faltas em sistemas de distribuição subterrâneos é comum se utilizar o TDR (Time Domain Reflectometry), um aparelho que emite um sinal de alta frequência, o qual é refletido ou absorvido pelos vários pontos da linha. Porém, a análise do sinal obtido com o uso desse aparelho é um desafio devido aos transitórios encontrados na forma de onda retornada. Dessa forma, os objetivos deste estudo são a análise e o desenvolvimento de técnicas que possibilitem a localização das faltas em cabos subterrâneos por meio de um diagnóstico preciso da forma de onda adquirida pelo uso do TDR, possibilitando o reparo de problemas de forma mais rápida e efetiva, melhorando a qualidade no fornecimento de energia.

**Palavras-chave** – cabos subterrâneos, qualidade, localização de defeitos, sistema especialista, reflectometria.

## I. INTRODUÇÃO

As expectativas por qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia, associadas ao crescimento da demanda nos diversos segmentos, têm obrigado a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e as concessionárias a buscarem alternativas eficazes para satisfazer a relação Custo/Benefício, considerando a nova realidade do setor elétrico brasileiro.

Um dos passos mais importantes para se desenvolver um sistema de detecção e localização de faltas é a modelagem dos transitórios de forma que os computadores possam extrair as características dos distúrbios e reconhecê-los automaticamente, de modo mais eficiente.

Em geral, a detecção de transitórios em tempo real é um desafio, pois, em geral, tais sinais são aperiódicos, não-estacionários, e de curta duração de tempo. Em sistemas de distribuição subterrâneos é comum se utilizar o TDR, um aparelho que emite um sinal de alta frequência, que é refletido ou absorvido pelos vários pontos da linha.

Quando esse sinal retorna ao dispositivo, possibilita a localização do trecho de ocorrência da falta, se o mesmo for analisado corretamente, tornando mais rápido o reparo desta falta. No entanto, o sinal recebido pelo TDR é de difícil

análise, já que as oscilações provocadas por faltas ou simples emendas são muito parecidas. Com a finalidade de auxiliar essa análise, o presente estudo propõe o desenvolvimento de uma metodologia computacional para a avaliação do sinal retornado ao TDR.

Como base científica para o estudo, várias técnicas foram analisadas para a detecção e localização do defeito e todos esses dados servirão de subsídios para o desenvolvimento de um Sistema Especialista.

## II. FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

A detecção de um transitório ou de um sinal de energia finita em conjunto com interferências é um assunto de interesse de muitas áreas [1, 2 e 3]. Dessa forma, foi efetuado um estudo inicial para a verificação das melhores técnicas estatísticas para localização das faltas em cabos subterrâneos, através da análise da forma de onda obtida com o TDR. Algumas dessas técnicas são descritas a seguir

### A. Estatística do Valor Médio Quadrático – RMS

Para um dado tempo  $t$ , o valor RMS de um sinal  $f(t)$  pode ser expresso por (1):

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T}^T f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f^2(i)} \quad (1)$$

onde  $T$  é o intervalo de integração e  $N$  é o número discreto de dados da função no intervalo de  $T$ .

Devido a sua característica de média estatística, o valor RMS de um sinal é semelhante a um filtro passa-baixa, e quando empregado, pode, eventualmente, ocultar alguma característica do sinal original.

### B. Estatística de Correlação

Objetivo da Estatística de Correlação é medir o grau de semelhança entre dois sinais e, assim, extrair alguma informação que dependa de certa forma da aplicação. Correlações de sinais são frequentemente encontradas em radar, sonar, comunicação digital, geologia e outras áreas em ciências e engenharia [4].

---

Este trabalho é parte dos resultados do P&D intitulado “Desenvolvimento de Tecnologia para Localização de Defeitos em Cabos Subterrâneos de Baixa Tensão”, ciclo 2003/2004, que recebeu apoio financeiro da AES-Eletropaulo.

Sejam duas seqüências  $x(n)$  e  $y(n)$  que se deseja comparar. Em aplicações de radar ou sonar, por exemplo,  $x(n)$  pode representar o sinal amostrado transmitido e  $y(n)$  o sinal amostrado recebido. Na prática, o sinal é altamente corrompido por ruído de modo que uma inspeção visual de  $y(n)$  não revela a presença ou ausência do sinal desejado refletido.

A correlação fornece um meio de extrair esta importante informação de  $y(n)$ .

Assim, supondo-se dois sinais amostrados reais  $x(n)$  e  $y(n)$  possuindo, cada um, energia finita, a correlação cruzada de  $x(n)$  e  $y(n)$  é a seqüência  $r_{xy}(l)$  definida por (2):

$$r_{xy}(l) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-l) \quad (2)$$

$l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

onde índice  $l$  é o parâmetro de deslocamento no tempo e os subscritos  $xy$  indicam as seqüências sendo correlacionadas.

### III. IMPLANTAÇÃO DA LINHA PILOTO

Para a realização do estudo, foram efetuados ensaios utilizando uma Linha Piloto implantada na UNESP de Bauru pela equipe da AES-Eletropaulo.

Na Linha Piloto utilizada para os ensaios, existiam 13 terminais disponíveis, sendo acessíveis os terminais 1, 2, 6, 9, 11 e 13. A Figura 1 exibe a configuração da Linha Piloto utilizada nos ensaios.

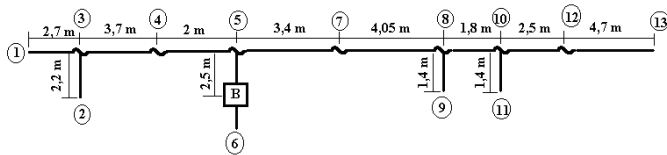


Figura 1. Configuração da Linha Piloto.

A Figura 2 apresenta uma foto da Linha Piloto em uma vala (local de implantação) após a sua instalação e a Figura 3 exibe a equipe técnica da AES-Eletropaulo em um dos procedimentos para implantação da Linha Piloto.



Figura 2. Foto da Linha Piloto.

Essa linha foi enterrada posteriormente para dar maior

validade aos ensaios experimentais, mantendo o foco dos ensaios em linhas subterrâneas de baixa tensão.



Figura 3. Preparação para confecção de uma emenda de transição.

### IV. ENSAIOS NA LINHA DE TESTE

Os ensaios de faltas com a linha desenergizada foram realizados com o TDR, sendo sempre realizadas três medidas entre o terminal neutro (enumerado como 0) e cada uma das fases (enumeradas de 1 a 3). Uma medida entre o terminal neutro e a blindagem também foi realizada, sempre que essa última estava disponível.

O TDR fornecia, para uma dada medição, um arquivo de dados com 6144 amostras que representava a forma de onda obtida. A taxa de amostragem utilizada pelo equipamento era de 1 nano-segundo.

Para a análise das técnicas de detecção de falta apresentadas neste trabalho foram realizados os ensaios de 1 a 4 que representam uma situação normal sem falta, e os ensaios de 5 a 8 que simulam uma falta entre os condutores 0 e 1 no ponto 9, conforme mostra a Tabela I.

TABELA I  
ENSAIOS REALIZADOS NA LINHA PILOTO NA UNESP, BAURU.

Nº	Ponto de Injeção no Circuito	Descrição do Defeito	Posição do Defeito	Condutor de Injeção (TDR)
1	1	sem Defeito	-	1
2	1	idem	-	2
3	1	idem	-	3
4	1	idem	-	Blindagem
5	1	curto-circ. em 0 e 1	9	1
6	1	idem	9	2
7	1	idem	9	3
8	1	idem	9	

### V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Utilizando-se o software MATLAB<sup>®</sup> operando em uma plataforma Windows foram desenvolvidas as rotinas relativas às estatísticas descritas na Seção II.

A Figura 4 mostra as curvas obtidas nos ensaios de 1 a 4

em que se mediram as ondas refletidas nos condutores 1, 2 e 3 respectivamente: Nesses gráficos, o eixo vertical denominado de distância (em metros) significa que o aparelho TDR conseguia medir até 500 metros do ponto de injeção do sinal para a velocidade de propagação utilizada (VOP) de 54%.

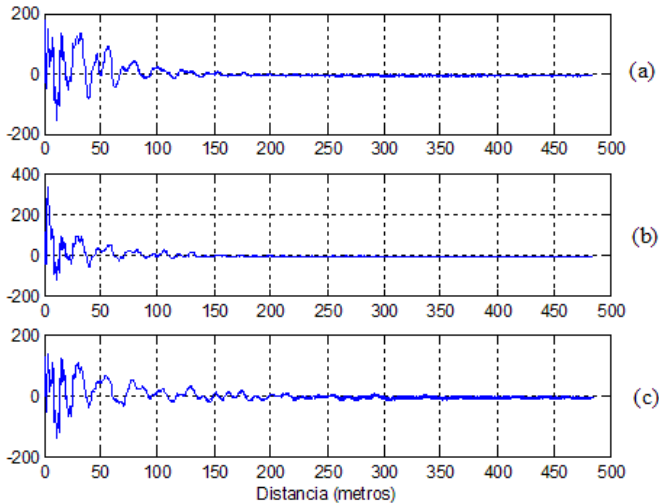


Figura 4. Medidas com TDR: a) Condutores 0 e 1; b) Condutores 0 e 2; c) Condutores 0 e 3, para Ensaios sem falta.

Observa-se na Figura 4 que as ondas adquiridas nos ensaios de 1 a 3 representam uma simulação de uma linha sem defeito, ou seja, todos os terminais abertos e a linha desenergizada.

É importante se conhecer o comportamento dos sinais do TDR de uma linha sem defeito para estabelecer-se um padrão de comparação para os resultados obtidos de uma linha com algum tipo de falta. Aplicando-se os algoritmos desenvolvidos para a Estatística de Correlação implementados no MATLAB®, obtiveram-se os resultados para os ensaios de 1 a 3, os quais são apresentados nas Figuras 5 a 7:

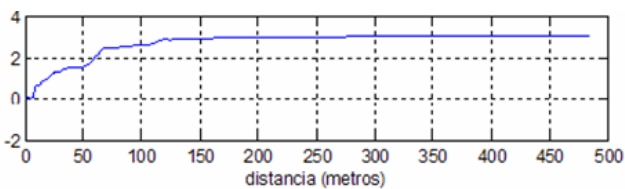


Figura 5. Autocorrelação entre 0-1 e 0-2 para Ensaio sem falta.

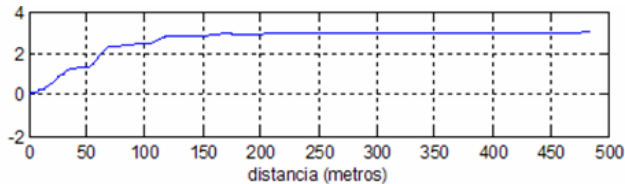


Figura 6. Autocorrelação entre 0-1 e 0-3 para Ensaio sem falta.

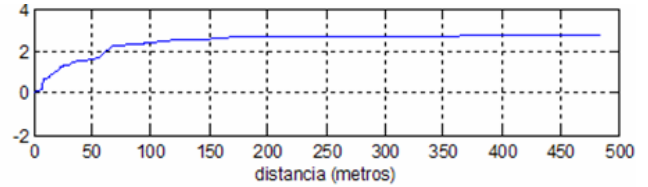


Figura 7. Autocorrelação entre 0-2 e 0-3 para Ensaio sem falta.

A partir dos gráficos mostrados nas Figuras 5 a 7, observa-se que a correlação entre os sinais medidos para os três condutores não apresentou resultados muito diferentes entre si, ou seja, no início do sinal a correlação aumenta gradualmente de zero até um valor de regime acima de 150 metros.

No entanto, não há significado prático para os sinais obtidos acima de 24,85 metros, pois este é o comprimento da linha piloto. Nota-se que no trecho de 24,85 metros a correlação dos sinais para a linha sem defeito comporta-se com uma tendência linear, podendo-se aproximar esse trecho por uma reta, sem erros consideráveis, e, conseqüentemente, avaliar a sua inclinação.

A Figura 8 apresenta os sinais obtidos nos ensaios de 5 a 7, nos quais se simulou um curto-circuito entre os condutores 0 e 1.

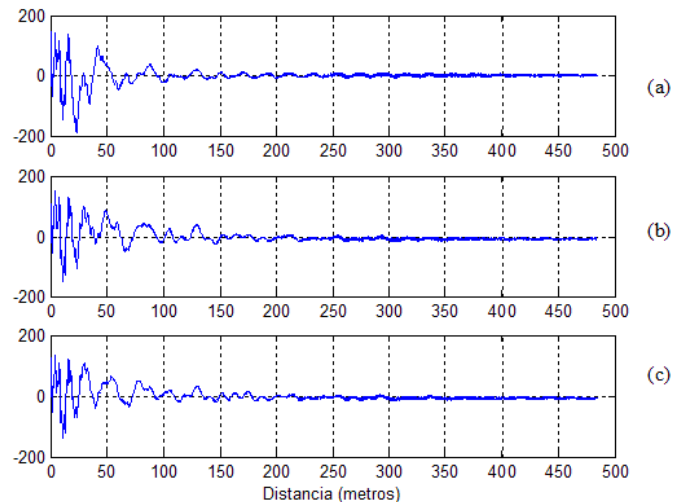


Figura 8. Medidas com TDR: a) Condutores 0 e 1; b) Condutores 0 e 2; c) Condutores 0 e 3, para Ensaio com falta.

Os sinais mostrados na Figura 8 representam o comportamento da linha na condição de curto-circuito entre os condutores 0 e 1 no ponto 9 da linha piloto, o qual dista 17,25 metros do ponto 1 onde foi injetado o sinal.

A partir do gráfico da Figura 8(a) obtém-se 18,9 metros quando o início do maior pico negativo cruza pelo zero. Assim, o TDR errou em 1,65 metros para esta simulação de defeito na linha piloto.

As Figuras 9 a 10 mostram os resultados obtidos quando a estatística de correlação foi utilizada nos dados dos ensaios de 5 a 7.

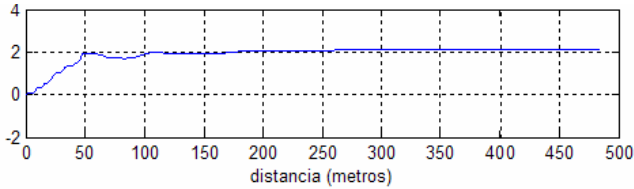


Figura 9. Correlação entre 0-1 e 0-2.

Observa-se na Figura 9 que a correlação entre o sinal dos condutores 0-1 e condutores 0-2 apresentou uma pequena sobre-elevação do sinal e que a forma de onda no trecho da linha se manteve bem mais linear, possuindo um coeficiente angular também maior quando comparado com a correlação da linha sem defeito.

A Figura 10 mostra a correlação entre os sinais dos condutores 0-1 e 0-3, em que se observa claramente um sobresinal bem mais acentuado, e o coeficiente angular para este caso é ainda maior.

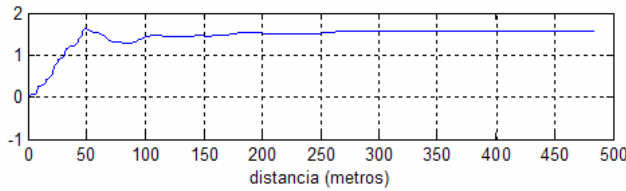


Figura 10. Correlação entre 0-1 e 0-3.

Para a correlação entre os sinais dos condutores 0-2 e 0-3 os quais não sofreram falta alguma se observa um comportamento muito semelhante à obtida para os ensaios de 1 a 3, ou seja, a correlação apresentou um coeficiente angular menor.

Para o processamento dos sinais coletados utilizando a estatística RMS, obtiveram-se os resultados mostrados nas Figuras 11 a 13 para os ensaios de 1 a 3. Salienta-se que a constante de tempo de integração utilizada para o cálculo dos valores RMS obtidos foi de 4 nano-segundos. Assim,  $N$  é igual a 4 na equação (1).

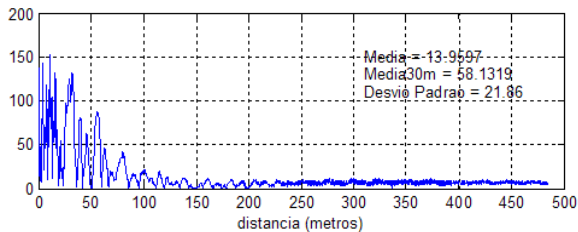


Figura 11. Valor RMS de 0-1 para Ensaio sem falta.

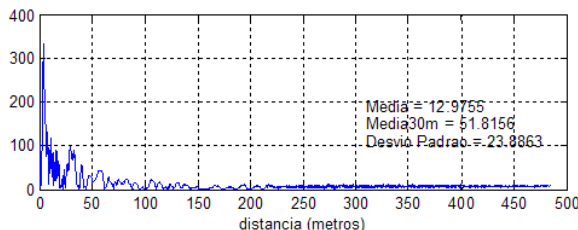


Figura 12. Valor RMS de 0-2 para Ensaio sem falta.

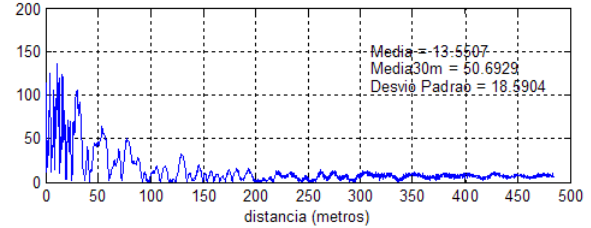


Figura 13. Valor RMS de 0-3 para Ensaio sem falta.

Observa-se nos gráficos das Figuras 11 a 13 as variações acentuadas no valor RMS durante o período transitório das formas de onda. Para este ensaio, no entanto, observa-se que as médias bem como os desvios padrões calculados dos valores RMS obtidos para os diferentes condutores não variaram de forma considerável entre si, e não apresentaram uma tendência, o que era esperado, visto que se simulou uma situação sem falta.

As Figuras 14 a 16 mostram os resultados dos valores RMS obtidos para os ensaios 5 a 8, em que se simulou um curto-circuito entre os condutores 0 e 1 no ponto 9, e o sinal do TDR foi injetado no ponto 1 da linha piloto.

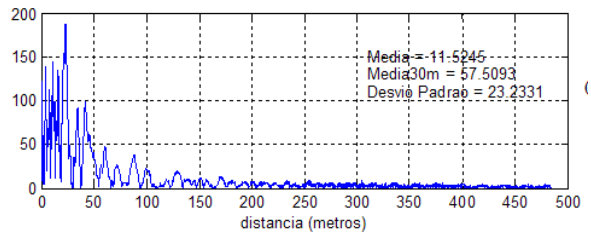


Figura 14. Valor RMS de 0-1 para Ensaio com falta.

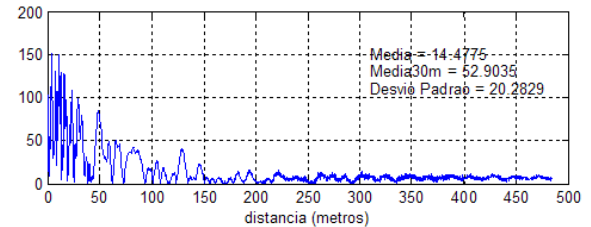


Figura 15. Valor RMS de 0-2 para Ensaio com falta.

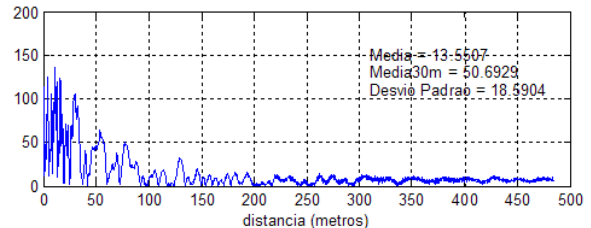


Figura 16. Valor RMS de 0-3 para Ensaio com falta.

Os valores calculados de média para cada sinal RMS se deram ao longo da duração do sinal (500 metros) e para os 50 primeiros metros considerados na escala horizontal. Nota-se que a média para os 50 metros iniciais subiu consideravelmente como esperado, pois o comprimento da linha é de apenas 24,85 metros. Salienta-se que o critério de

cálculo para as médias poderia ser exatamente no comprimento da linha piloto ensaiada. No entanto, isso não foi realizado pois, na prática, pode-se não conhecer exatamente o comprimento de uma linha a ser testada.

A partir das Figuras 14 a 16 observa-se que os sinais RMS sofrem também variações consideráveis no período transitório do sinal original. Nota-se claramente que o maior pico ocorreu em 22,9 metros e o seu início em 18,4 metros. Considerando, como anteriormente, o início do maior pico como o ponto de ocorrência do defeito, e sabendo-se que o defeito ocorreu em 17,25 metros, calcula-se um erro de 1,15 metros.

Adicionalmente, observa-se que as médias dos valores RMS calculadas ao longo da duração do sinal não revelam indicação de defeito. Por outro lado, quando se calcula a média para os 50 metros iniciais, observa-se que o maior valor obtido é referente ao curto-circuito entre os condutores 0 e 1, cujo valor é de 57,5. Além disso, o valor do desvio padrão calculado ao longo da duração dos sinais foi também maior para os condutores em curto-circuito.

Esses resultados mostram que tanto a média para os 50 metros quando o desvio padrão calculado ao longo de todo o sinal consegue detectar a falta simulada.

## VI. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA

Como forma de automatizar o processo de identificação das faltas, foi desenvolvido um Sistema Especialista denominado SubControl-BT, que inclui um módulo de controle de ocorrências e um de localização de defeitos.

O módulo de controle possui como objetivos a elaboração de um banco de dados atualizados sobre os principais defeitos encontrados nos sistemas subterrâneos de baixa tensão e o estabelecimento de procedimentos técnicos para a minimização dos tempos envolvidos com a correção dos defeitos que normalmente são observados nesse sistema.

O módulo de localização utiliza ferramentas estatísticas, dados estruturais e técnicos dos circuitos subterrâneos e realiza a localização dos defeitos.

A Figura 17 apresenta janela principal deste software, contendo as opções de Arquivo e Processamento.

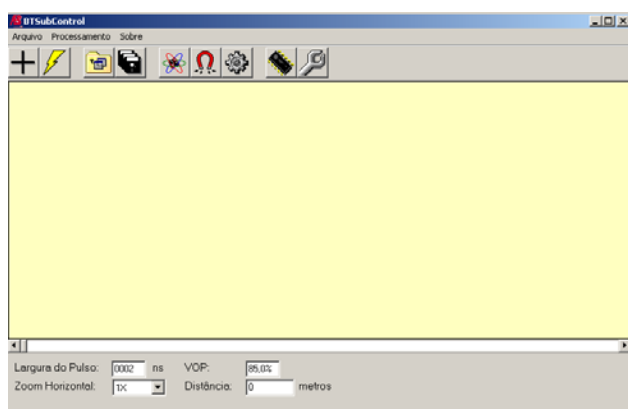


Figura 17. Janela inicial de trabalho do software

A Figura 18 apresenta as Ferramentas de Comparação que realizarão automaticamente as análises referentes a melhor estatística para a identificação do defeito.

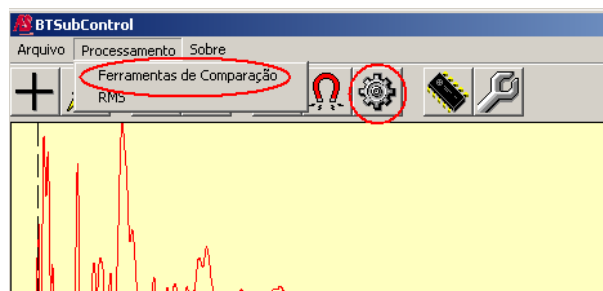


Figura 18. Janela com a opção Ferramentas de Comparação

A Figura 19 ilustra a visualização da comparação de duas formas de onda na mesma janela.

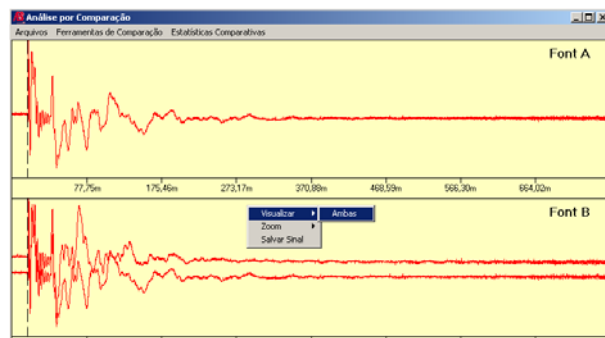


Figura 19. Visualização Dupla

O Sistema Especialista (SubControl-BT) desenvolvido oferece inúmeras contribuições que auxiliam a localização de faltas em cabos subterrâneos. A facilidade com que os dados podem ser manipulados e os resultados obtidos com uma análise praticamente instantânea torna o programa extremamente inovador.

Anteriormente, a análise dos dados era realizada através de softwares proprietários que dispunham de recursos para a visualização da forma de onda, todavia não incluíam suporte à análise e processamento de sinais. O Sistema Especialista supera em diversos aspectos os softwares existentes, seja através de um ambiente amigável, fácil e rápido ou mesmo por meio dos recursos de análise e processamento da forma de onda.

## VII. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para os ensaios realizados pode-se concluir que a análise de defeitos ocorridos em linhas de distribuição subterrâneas utilizando apenas o TDR pode ser uma tarefa difícil, visto que a interpretação das formas de ondas obtidas nos ensaios não é trivial e de fácil entendimento para o usuário em campo.

Observou-se que o TDR de fato consegue detectar e localizar as faltas ensaiadas, embora apresentando um erro possivelmente tolerado pelas concessionárias, na ordem de 9,57%.

Dois técnicas estatísticas foram empregadas com o



objetivo de se avaliar e possivelmente detectar e localizar melhor a falta simulada. Observou-se que a correlação traz um comportamento semelhante para os sinais onde a falta não ocorreu, principalmente no tocante a inclinação de uma reta aproximada no trecho da linha considerada.

No entanto, nota-se que a correlação apresenta um coeficiente angular maior quando efetuada com os condutores em curto-circuito. Assim, a detecção poderia ser feita utilizando-se como parâmetro o coeficiente angular da reta no trecho da linha. Por outro lado, a localização da falta não foi completamente estudada para esta estatística, e futuras investigações se fazem necessárias.

Para a estatística do valor médio quadrático (RMS) observou-se claramente que a mesma consegue detectar e localizar o defeito simulado através das características do maior pico observado nesta estatística.

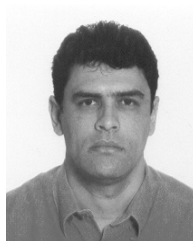
Além disso, podem-se utilizar como parâmetros de detecção a média do valor RMS para o trecho considerado e o desvio padrão calculado ao longo da duração da onda. Ainda, a utilização da estatística RMS se mostra mais amigável quanto à análise dos resultados para a detecção e localização de faltas.

Em resumo, o operador encontrará um ambiente mais amigável e rápido e, além disso, terá em mãos uma ferramenta de análise, processamento e detecção do ponto de localização do defeito, por meio das formas de ondas adquiridas nos TDRs. Então, na perspectiva de melhoria na prestação de serviços, a empresa poderá estabelecer índices mais elevados no fornecimento de energia elétrica com qualidade.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. H. Chen, "Seismic and underwater waveform analysis," in Handbook of Pattern Recognition and Image Processing (Academic Press, New York, NY, 1986), pp. 527-544.
- [2] T. Van Eck, and L. G. Ahlbom, "Automatic event detection applied to single channel seismic records," Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Proc., Paris, France, pp. 1894-1897, 1982.
- [3] G. Bodenstein and H. M. Praetorius, "Feature extraction from the electroencephalogram by adaptive segmentation," Proc. IEEE, vol. 65, no. 5, pp. 642-652, 1997.
- [4] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications," Third Edition, Prentice Hall, 1996.
- [5] Trageser, A., et al, " Analysis of sheath transients in specially bonded cable systems using EMTP". International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1998, vol. 2, pp. 694 -697
- [6] Stringer, N., Kojovic, L.A., "Prevention of underground cable splice failures". IEEE Annual Meeting on Industrial and Commercial Power Systems, 2000, pp. 83 - 93.
- [7] Glinkowski, M.T., "ANNs pinpoint underground distribution faults". IEEE Computer Applications in Power , 1995, vol. 8, pp. 31 - 34.
- [8] King, C. C. "Worker Safety During Various Maintenance Procedures Common to Underground Residential Distribution" in Proc. 2003 IEEE Power Engineering Society Electrical Safety & Maintenance of Lines Conf.

## IX. BIOGRAFIA



**André Nunes de Souza** nasceu em São Paulo, em 7 de Agosto de 1965. Obteve sua Graduação em Engenharia Elétrica em 1991 pela Universidade Mackenzie. Mestre (1995) e Doutor (1999) pela Escola Politécnica da USP – EPUSP e Livre Docente (2005) pela UNESP-Bauru. Trabalhou durante 12 anos no IEE-USP nos Laboratórios de Alta Tensão e Altas Correntes. Atualmente, coordena o Laboratório de Sistemas de Potência e Técnicas Inteligentes na Faculdade de Engenharia de Bauru - FEB. Atua nas áreas de alta tensão e técnicas inteligentes aplicadas em sistemas de energia.