

## GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO - GDI

### SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM CABOS ISOLADOS – DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO

**DANIEL DE ANDRADE USSUNA(1); RENATTO VAZ CARVALHO(1); VITOLDO SWINKA FILHO(1); VICTOR SALVINO BORGES(1); GUILHERME CUNHA DA SILVA(1)  
LACTEC(1)**

#### RESUMO

Este trabalho apresenta os principais resultados do projeto de P&D ANEEL 4950-0378/2011 em parceria com a CEMIG, que trata do desenvolvimento e validação de um sistema de localização de faltas em cabos isolados aplicados em redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica classe 8,7/15 e 12/20 kV. Para atingir os resultados, foram estudadas as características elétricas de cabos isolados com dielétrico XLPE e EPR aplicados em redes subterrâneas de média tensão e a validação do sistema foi efetuada em laboratório em cabos de 50, 240 e 400 mm<sup>2</sup>, com erros inferiores a 3,5 % em comprimentos de até 500 metros.

#### PALAVRAS-CHAVE

Cabos isolados; Rede subterrânea; Média Tensão; Localização de defeitos; Reflectometria no domínio do tempo.

#### 1. INTRODUÇÃO

Redes aéreas de distribuição de energia elétrica apresentam elevado número de interrupções no fornecimento, geralmente relacionadas com queda de postes ou condutores decorrentes de acidentes com veículos, contato de condutores com galhos de árvores ou animais ou por meio de interferências causadas por descargas atmosféricas que atingem a linha. A necessidade de redução destes fatores favorece a busca por alternativas nas formas de distribuição de eletricidade aplicadas pelas concessionárias. Dessa forma, as redes de distribuição de energia elétrica subterrâneas vêm ganhando cada vez mais espaço de aplicação, pois, além de não apresentar os problemas supracitados, apresentam menor impacto no aspecto visual e de urbanização, que é uma exigência de grandes empreendimentos urbanos atuais.

Os cabos aplicados nessas redes são, em sua totalidade, compostos pela estrutura de um cabo coaxial, com a diferença que possuem uma camada semicondutora interna e outra externa à camada dielétrica. Estas camadas são responsáveis por uniformizar a distribuição radial de campo elétrico no interior do dielétrico [1], evitando a formação de pontos de concentração de campo que podem ocasionar na ruptura do sistema isolante. As camadas e os elementos que compõem um cabo isolado estão apresentados na Figura 1.

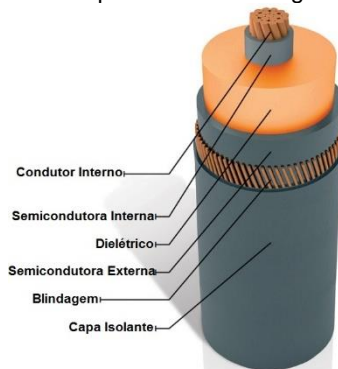


Figura 1. Estrutura de cabos isolados.

Pelas dificuldades de acesso às galerias subterrâneas, métodos de avaliação e localização de defeitos nos equipamentos (cabos, conectores, transformadores, etc.) se mostram de grande importância no que diz respeito à redução dos custos associados à intervenção e operação do sistema.

Este artigo visa apresentar os principais resultados do projeto de P&D ANEEL 4950-0378/2011, que trata do desenvolvimento e validação de um sistema de localização de faltas em cabos isolados aplicados em redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica. Como resultado principal do projeto foi desenvolvido um protótipo de equipamento que traz a informação gráfica da posição de defeitos tanto na camada dielétrica do cabo como na condição da continuidade do condutor central. Para atingir os resultados da aplicação foram estudadas as características elétricas de cabos isolados com dielétrico de polietileno entrecruzado (XLPE) e borracha extrudada

de etilenopropileno (EPR) aplicados em redes subterrâneas de média tensão, 8,7/15 e 12/20 kV. Estas características foram extraídas aplicando conceitos de linhas de transmissão eletromagnéticas (LT), pois a técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR), empregada no desenvolvimento do protótipo final, se utiliza de sinais de alta frequência para aferir a posição de defeitos na estrutura do cabo, neste caso LT.

## 2. REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

A TDR se baseia na injeção de pulsos de alta frequência em uma LT e verificação do tempo de propagação de possíveis reflexões resultantes de descasamentos de impedância nessa LT [2]. Para que seja possível verificar estas reflexões é necessário que a duração do pulso aplicado ao cabo seja muito menor que o tempo de propagação total do sinal no cabo, caso contrário o sinal refletido pode se sobrepor ao sinal incidente gerando dificuldade na interpretação dos dados.

Considerando uma fonte de tensão  $V_s$ , com resistência interna  $R_s$ , conectada a uma carga com impedância  $Z_L$  por meio de uma LT com impedância característica  $Z_0$ , como apresentado na Figura 2., a relação entre as impedâncias de carga e da LT pode resultar em reflexões de sinal ou completa absorção do mesmo pela carga.

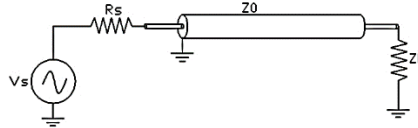


Figura 2. Conexão de uma fonte com uma carga por meio de uma LT.

O coeficiente de reflexão  $\Gamma$  representa o descasamento de impedância entre dois elementos e determina quanto da energia é refletida quando um sinal passa pelo ponto de união desses dois elementos [3],[4]. Este coeficiente pode ser calculado pela equação 1.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

Caso não haja descasamento de impedância, ou seja,  $Z_L = Z_0$ , não haverá reflexões e o sinal incidente é completamente absorvido pela carga. Caso  $Z_L > Z_0$ , haverá reflexão do sinal com polaridade igual à do sinal incidente e caso  $Z_L < Z_0$ , haverá reflexão do sinal com polaridade invertida em relação ao sinal incidente.

Cabos isolados podem ser interpretados como uma LT coaxial, pois apresentam geometria constante ao longo de todo o seu comprimento e com isso algumas características elétricas invariáveis. A capacitância por unidade de comprimento dessa LT pode ser expressa pela equação 2.

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(b/a)} \text{ [F/m]} \quad (2)$$

Onde  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo,  $\epsilon_r$  a permissividade elétrica relativa do dielétrico, 'a' o raio interno e 'b' o raio externo do dielétrico.

A indutância por unidade de comprimento é outro parâmetro que pode ser obtido através da característica geométrica do cabo, como apresentado pela equação 3.

$$L' = \frac{\mu_0\mu_r}{2\pi} \ln(b/a) \text{ [H/m]} \quad (3)$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa do dielétrico. Pelo fato do dielétrico ser um material não magnético, considera-se que  $\mu_r = 1$ .

Para sinais de alta frequência a componente capacitiva e a componente indutiva da LT apresentam contribuição mais significativa para determinação da impedância característica da LT e pode ser aproximada para a equação 4.

$$Z_0 = \sqrt{L'/C'} \text{ [\Omega]} \quad (4)$$

Como a impedância característica da LT depende das características elétricas e geométricas do dielétrico é possível afirmar que qualquer variação destas pode vir a alterar a impedância característica local do cabo, resultando em condições de descasamento de impedância.

Outro parâmetro de importância para análise de sinais de reflectometria é a velocidade de propagação de sinais eletromagnéticos nessa LT, que é dependente da capacitância e indutância como apresentada na equação 5.

$$v_p = 1/\sqrt{L'C'} \text{ [m/s]} \quad (5)$$

O ponto tomado como referência para aplicação do pulso incidente e análise das reflexões é sempre um dos extremos, por conta do comprimento elevado dos cabos, que pode variar de dezenas a centenas de metros. Com esta condição estabelecida considera-se que o pulso refletido percorre duas vezes o comprimento do cabo, do início até o ponto de descasamento de impedância. O cálculo da distância até o ponto de descasamento de impedância passa a ser calculado pela equação 6.

$$d = vp \frac{\Delta t}{2} \text{ [m]} \quad (6)$$

O descasamento de impedância pode representar um defeito simples, como o rompimento do cabo ( $Z_L \gg Z_0$ ), um curto circuito ( $Z_L \approx 0$ ) ou defeitos específicos da degradação do cabo, como o surgimento de arborescências que variam a impedância local em valores intermediários, sendo estas as condições que o protótipo deve atender.

### 3. DEFEITOS NA CAMADA DIELETRICA DE CABOS ISOLADOS E TDR EM ALTA TENSÃO

Os possíveis defeitos na camada isolante do cabo, que podem causar ruptura dielétrica quando submetido ao elevado campo elétrico nominal, são oriundos de falhas no processo de fabricação, danos no momento da instalação ou degradação causada por intempéries ambientais no local em que o cabo se encontra instalado.

A Figura 3 ilustra tais defeitos, onde as lacunas, protuberâncias e interrupção na blindagem correspondem a falhas construtivas. Trincas e interrupção da blindagem podem ser provocadas por esforços mecânicos durante o processo de instalação. As arborescências em água correspondem à penetração de umidade no polímero. Esses defeitos, quando submetidos ao campo elétrico, favorecem o surgimento de descargas parciais. Por sua vez, estas descargas podem transformar arborescências em água em arborescências elétricas, as quais, em última instância podem atravessar o volume do dielétrico causando sua completa ruptura [5],[6].

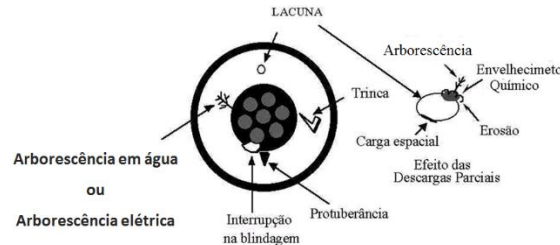


Figura 3. Ilustração de possíveis defeitos em cabos isolados.

Os equipamentos conhecidos comercialmente utilizam a TDR com pulsos de baixa tensão e pulsos sequenciais [2]. O método de múltiplo impulso é aplicado quando o pulso de baixa tensão de reflectometria não consegue identificar os defeitos de degradação. Este método consiste na aplicação de um pulso de alta tensão e baixa frequência, utilizado para ativar os defeitos de degradação, seguido de um segundo pulso ou múltiplos pulsos de baixa tensão e alta frequência que servem de referência para a reflectometria.

A característica inovadora do projeto P&D proposto consiste em utilizar um pulso único de alta tensão e alta frequência capaz de ativar os defeitos da camada dielétrica. Além disso, este mesmo pulso é utilizado como referência do sinal de reflectometria quando refletido.

### 4. EXPERIMENTOS DE APLICAÇÃO DA TDR

Neste tópico estão apresentados os experimentos de TDR, com pulsos de baixa tensão (com amplitude de dezenas de volts). De posse destes dados foi possível caracterizar os cabos e estabelecer a sequência de experimentos com pulsos de alta tensão que comprovassem a aplicação da técnica e ativação de defeitos.

#### 4.1. TDR em baixa tensão e caracterização de cabos

Uma forma simplificada de elaborar um reflectômetro no domínio do tempo é por meio da utilização de equipamentos básicos de laboratório, como gerador de função para aplicar o pulso de reflectometria, e osciloscópio para a detecção do pulso incidente e refletido [7], [8], como apresentado na Figura 4. Neste experimento foram aplicados o gerador de funções Tektronix AFG3101C e o osciloscópio TDS3034C do mesmo fabricante.

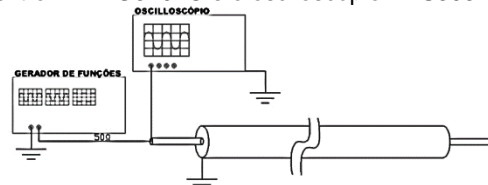


Figura 4. Estrutura de um reflectômetro no domínio do tempo elaborado com gerador de funções e osciloscópio.

No primeiro teste, fez-se o condutor central do cabo EPR, de 50 mm<sup>2</sup> e 150 metros de comprimento, manter contato com a blindagem, formando um curto-circuito na extremidade final. A reflectometria na condição de circuito aberto pode ser visualizada na Figura 5.

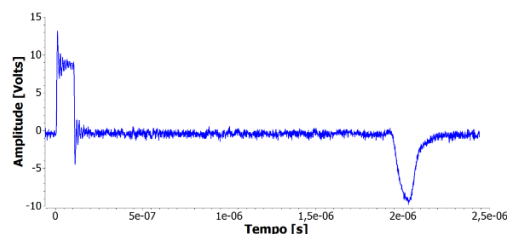


Figura 5. Reflectometria no cabo EPR (50 mm<sup>2</sup>, 150 m) na condição de curto-circuito.

Outro cabo utilizado no teste de reflectometria de baixa tensão foi de EPR, 240 mm<sup>2</sup> e 500 metros de comprimento. A reflectometria na condição de circuito aberto pode ser visualizada na .

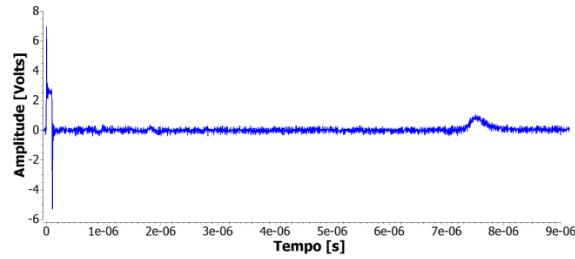


Figura 6. Reflectometria no cabo EPR (240 mm<sup>2</sup>, 500 m) na condição de circuito aberto.

Para o cabo em XLPE, de 240 mm<sup>2</sup> de 500 metros, foi efetuado o mesmo procedimento de reflectometria apresentado para os cabos EPR de 50 e de 240 mm<sup>2</sup>. Por meio da análise das curvas experimentais de reflectometria de baixa tensão foi possível determinar todos os parâmetros dos cabos, os quais estão apresentados na Tabela 1. Inicialmente foram determinadas a impedância característica do cabo e a velocidade de propagação dos pulsos. O pulso de 20 V foi programado no gerador de sinais, que tem impedância de saída 50 Ω.

Tabela 1. Parâmetros dos cabos EPR 50 e 240 mm<sup>2</sup>e XLPE 240mm<sup>2</sup>.

Parâmetro	EPR 50 mm <sup>2</sup>	EPR 240 mm <sup>2</sup>	XLPE 240mm <sup>2</sup>
$v_0$ [m/s]	$1,5 \cdot 10^8$ m/s	$1,4 \cdot 10^8$	$1,63 \cdot 10^8$
$Z_0$ [Ω]	35	15	18
$C'$ [pF/m]	180	472	342
$L'$ [nH/m]	220	106	111

De posse das impedâncias características dos cabos foi possível estabelecer as condições de casamento de impedância entre o gerador de pulso de alta tensão e os cabos isolados. Com os dados de velocidades de propagação foi estabelecido o algoritmo do *software* que determina a posição de descasamentos de impedâncias através da análise de reflectogramas de cada tipo de cabo.

#### 4.2. TDR com pulso único de alta tensão

O aparato experimental para aplicação da TDR com pulso único de alta tensão está representado no diagrama da Figura 7. Um capacitor de alta tensão é carregado utilizando uma fonte DC até o limite de ruptura da rigidez dielétrica do ar por meio de uma chave tipo *spark gap*. Esta ruptura gera um pulso de tensão que é aplicado ao cabo teste. O osciloscópio, equipado por uma ponta de prova de alta tensão, tem a função de armazenar os dados dos pulsos incidente e refletido.

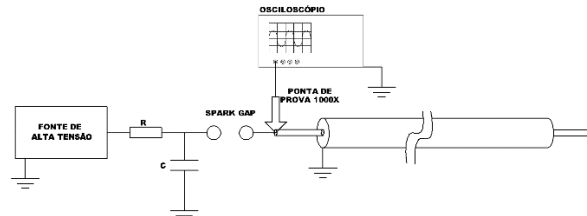


Figura 7. Aparato experimental para reflectometria no domínio do tempo utilizando pulso único de alta tensão.

A Figura 8 apresenta a reflectometria de alta tensão obtida para um cabo de EPR, de 50 mm<sup>2</sup> e 195 metros de comprimento, na condição de circuito aberto. O sinal aparece invertido por ter sido usada uma fonte de alta tensão DC com polaridade negativa.

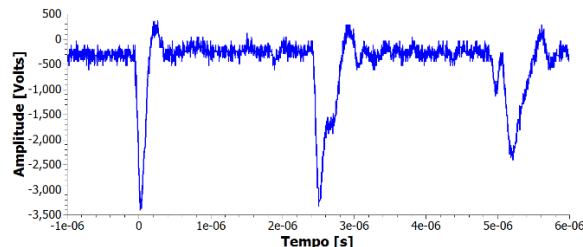


Figura 8. Reflectometria de alta tensão aplicada ao cabo EPR (50 mm<sup>2</sup>, 195 m) na condição de circuito aberto.

É possível visualizar que o pulso no cabo tem múltiplas reflexões, de mesma polaridade. Isto ocorre porque o pulso gerado pelo *gap* se propaga pela LT até o final onde o cabo está aberto e quando reflete, com mesma polaridade, a ionização do ar no *gap* se extinguiu. Neste ponto o *gap* se torna um ponto de alta impedância,  $Z_L \gg Z_0$  e o pulso reflete novamente com mesma polaridade para o final do cabo. Esta sequência de acontecimentos continua a ocorrer até que o pulso seja totalmente dissipado através das perdas da LT.

#### 4.3. Ativação de defeitos por pulso único de alta tensão

Na extremidade do cabo citado no item B foi inserido um segundo *gap*, com distância de 2 mm, para avaliar se defeitos com esta característica conseguem ser ionizados pelo pulso único de alta tensão. A comprovação de que é possível ativar um defeito com um pulso único de alta tensão está apresentada na Figura 9. Nesta figura duas curvas estão sobrepostas: a do pulso medido no final do cabo sem o *gap* (curva com final aberto) e a ruptura da rigidez dielétrica do ar quando o *gap* é inserido (curva final ionizado). Este teste foi efetuado aplicando o potencial de -10 kV DC. Foi verificado que o potencial de aproximadamente 8 kV é suficiente para que ocorra a ruptura da rigidez dielétrica do ar e o tempo de duração do pulso é suficiente para esta ocorrência.

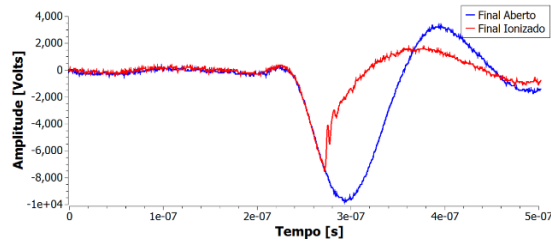


Figura 9. Ativação de defeito pelo pulso de alta tensão da reflectometria

### 5. PROTÓTIPO DE SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM CABOS ISOLADOS

Após as comprovações experimentais da aplicação de pulso único de alta tensão para ativação e localização de defeitos foi elaborado o sistema completo, com estrutura física para suportar os equipamentos e permitir o ajuste e controle do aparato experimental. O diagrama em bloco da Figura 10, apresenta a composição básica do sistema.

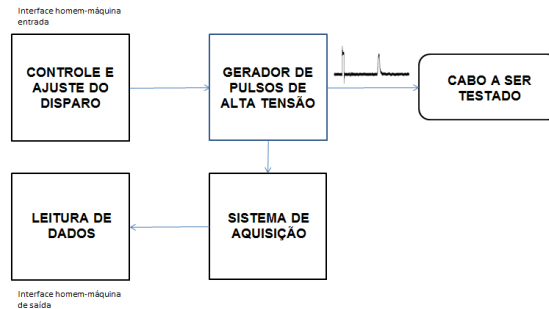


Figura 10. Diagrama em blocos do sistema

O bloco correspondente ao “CONTROLE E AJUSTE DO DISPARO” representa o painel do protótipo. Nele encontram-se os botões de acionamento e disparo dos pulsos, ajuste do nível de tensão e *display* de sinal representado por uma barra de *leds* dimensionada para apresentar 1 kV por cada led aceso.

Os comandos do painel atuam sobre o módulo do segundo bloco, “GERADOR DE PULSOS DE ALTA TENSÃO”, acionando o sistema que impulsiona a chave tipo *spark gap*, a qual gera pulsos com amplitude variável de 5 a 20 kV.

A atenuação e conversão analógico-digital dos sinais de reflectometria são realizados por meio do bloco de “SISTEMA DE AQUISIÇÃO”. Este bloco compreende a aplicação de atenuadores de tensão em um fator de 10.000 vezes e a digitalização por meio de uma placa de aquisição de dados rápida.

O bloco de “LEITURA DOS DADOS” corresponde à aplicação de um notebook com software desenvolvido para aquisição e análise dos reflectogramas.

O bloco “CABO A SER TESTADO” corresponde aos cabos de média tensão da rede subterrânea com isolamento em XLPE e EPR nos quais foram aplicados os testes.

### 6. VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para validação do protótipo foram realizados testes de reflectometria de AT em trechos de cabos novos disponíveis em laboratório e trechos de cabos da rede didática subterrânea da Companhia Paranaense de Eletricidade, situada no pólo Atuba, na cidade de Curitiba-PR.

#### 6.1. Validação em laboratório

O primeiro teste corresponde à aplicação do sistema ao cabo EPR 50 mm<sup>2</sup>, com comprimento de 150 metros. Neste cabo foi simulado um defeito, que consiste em um furo que atravessa as camadas do cabo até atingir o condutor central. O furo foi realizado na extremidade do cabo. Ao ajustar o potencial de 8 kV no sistema e disparar o pulso de reflectometria sobre o cabo com terminação aberta, obteve-se o reflectograma apresentado na Figura 11.a, onde o defeito não é ativado e o comprimento total é apresentado como 145,48 metros, o que equivale a 3% de erro na localização do defeito. Ao ajustar o potencial para 20 kV e disparar o pulso de alta tensão sobre o cabo, foi obtido o reflectograma apresentado na Figura 11.b, onde o defeito é ativado e a medida do comprimento passa a ser de 144,79 metros, isto é, 3,4% de erro na localização do defeito.

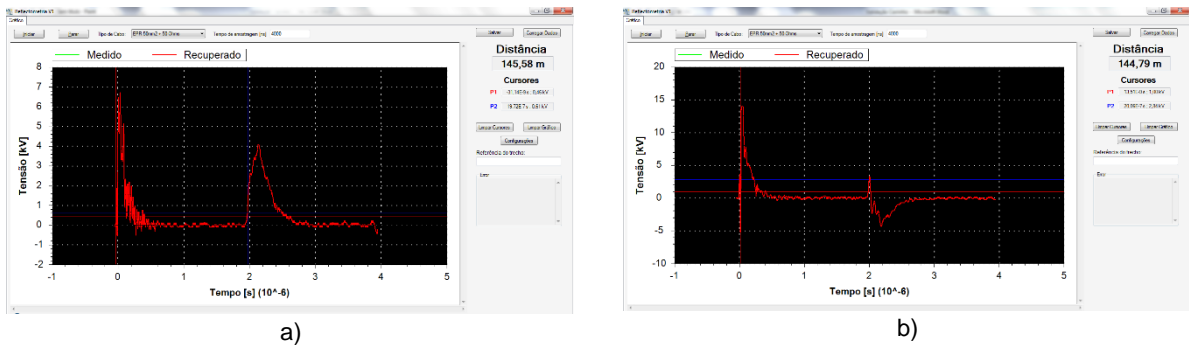


Figura 11. Reflectograma do cabo EPR (50 mm<sup>2</sup>, 150 m) com defeito simulado próximo ao final do cabo a) defeito não ativado com pulso de 8 kV e b). defeito ativado com pulso de 20 kV

O segundo teste realizado em laboratório consistiu em emendar o trecho de cabo de EPR, de 50mm<sup>2</sup> e 150 metros de comprimento, em um trecho de mesmo cabo com 45 metros de comprimento, formando um tronco de 195 metros com emenda a 150 metros do início.

Ao ajustar o potencial de 8 kV no sistema e disparar o pulso de alta tensão no cabo foi obtido o reflectograma apresentado na Figura 12.a. Pode ser observado que o defeito não foi ativado e que há uma oscilação causada por uma pequena variação de impedância no ponto da emenda. A distância total apresentada pelo *software* para esta condição foi de 189,56 metros, com 2,8% de erro na localização do defeito. Com o ajuste do potencial para 20 kV foi obtido o reflectograma da Figura 12.b **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde é possível verificar que o defeito foi ativado próximo ao ponto de emenda. A distância total apresentada pelo *software* para esta condição foi de 146,26 metros, equivalente a 2,5% de erro de localização no defeito. Outros testes foram realizados e a técnica de reflectometria em alta tensão apresentou-se eficiente para pulso de alta tensão de 20 kV, com erros de localização de defeito na faixa de 3%.

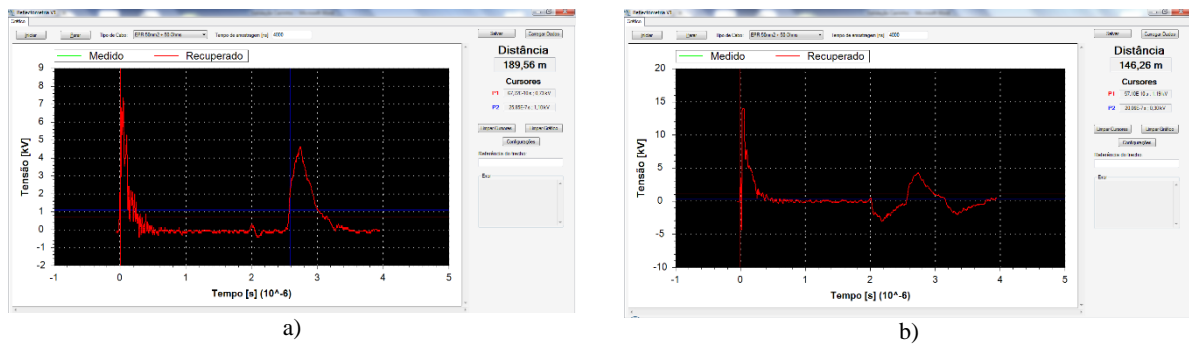


Figura 12. Reflectograma do cabo EPR (50 mm<sup>2</sup>, 195 m) com emenda em 150 metros a) defeito não ativado para pulso de 8 kV e b) defeito ativado próximo a emenda

## 6.2. Validação em campo

O primeiro teste realizado na rede subterrânea didática da Copel consistiu em aplicar o protótipo com potencial ajustado para 20 kV em um cabo de XLPE, de 50 mm<sup>2</sup> e 165 metros de comprimento, na condição de circuito aberto. A impedância deste cabo é de 35 Ω. Como resultado foi obtido o reflectograma da Figura 13.a, onde o comprimento total apresentado pelo *software* foi de 168,79 metros, com 2,3% de erro na localização de defeito.

O segundo teste consistiu em emendar dois trechos de 165 metros deste mesmo cabo e aplicar o potencial de 20 kV. Como resultado foi obtido o reflectograma da Figura 13.b, onde o comprimento total apresentado pelo *software* foi de 337,70 metros, com 2,3% de erro na localização de defeito.

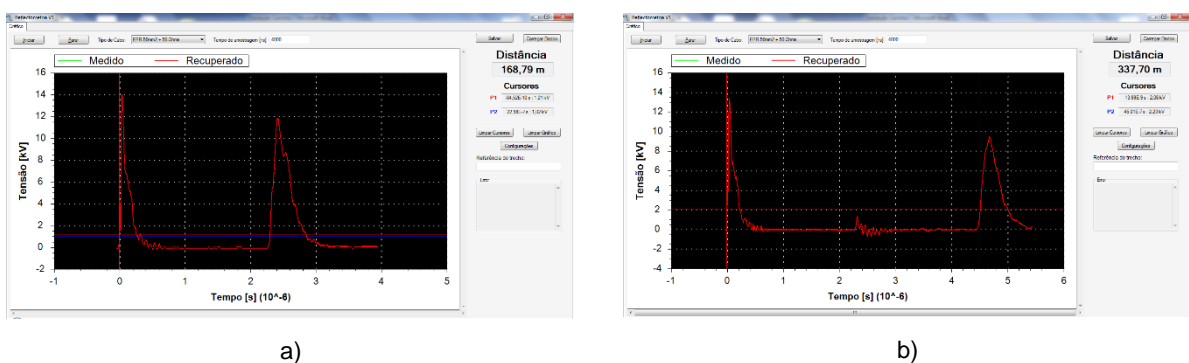


Figura 13. Reflectograma do a) cabo XLPE (50 mm<sup>2</sup>, 165 m) na condição de circuito aberto e b) dos cabos XLPE 50 mm<sup>2</sup> emendados totalizando 330 metros.



Ao analisar este reflectograma é possível verificar que na metade da distância, em 165 metros, há sinal que corresponde a emenda dos cabos.

O terceiro teste consistiu em unir mais um trecho de 165 metros de cabo XLPE, 50mm<sup>2</sup>, totalizando 495 metros de comprimento. Nesta configuração foi aplicado um potencial de 20 kV. Como resultado foi obtido o reflectograma da Figura 14.a, onde se obteve o comprimento total de 506,78 metros, com 2,4% de erro na localização de defeito. Novamente é possível verificar as duas emendas dos cabos em 165 metros e 330 metros.

Com esta mesma disposição, foi inserido na segunda emenda um *gap* ajustado com 2 mm de distância para verificar a possibilidade de ativação de defeitos. Como resultado foi obtido o reflectograma da Figura 14.b. Ao analisar este reflectograma é possível verificar que houve uma reflexão negativa, resultado da ativação do defeito próximo a emenda, em 335,46 metros. Esta medida apresenta um erro de localização do defeito de 1,65%.

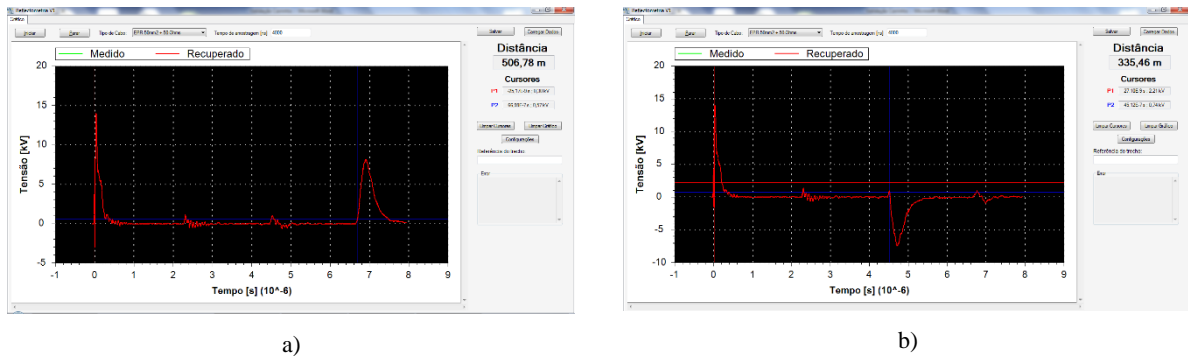


Figura 14. Reflectograma a) dos cabos XLPE (50 mm<sup>2</sup>) emendados, totalizando 495 metros de comprimento e b) Reflectograma dos cabos XLPE (50 mm<sup>2</sup>) emendados, totalizando 495 metros e com *gap* simulado em 330 metros.

Outro objeto de teste utilizado para a validação em campo foi um cabo XLPE de 400 mm<sup>2</sup>, com impedância característica de 15 Ω. Neste teste foi aplicado o potencial de 20 kV sobre o tronco formado pela emenda de dois cabos de 69 metros cada. O reflectograma da Figura 15.a apresenta este teste com o final do trecho em aberto. Novamente, na metade do reflectograma é possível verificar a emenda dos cabos. Este teste apresenta localização de defeito em 137,27 metros, com erro de localização de defeito de 0,52%.

Na sequência foi inserido um *gap* de 2 mm na emenda. Ao disparar o potencial de 20 kV foi obtido o reflectograma da Figura 15.b. Ao analisar este reflectograma é possível verificar que na emenda, em 70,23 metros, foi ativado o defeito, representado por uma reflexão negativa. O erro de localização deste defeito foi de 1,78%.

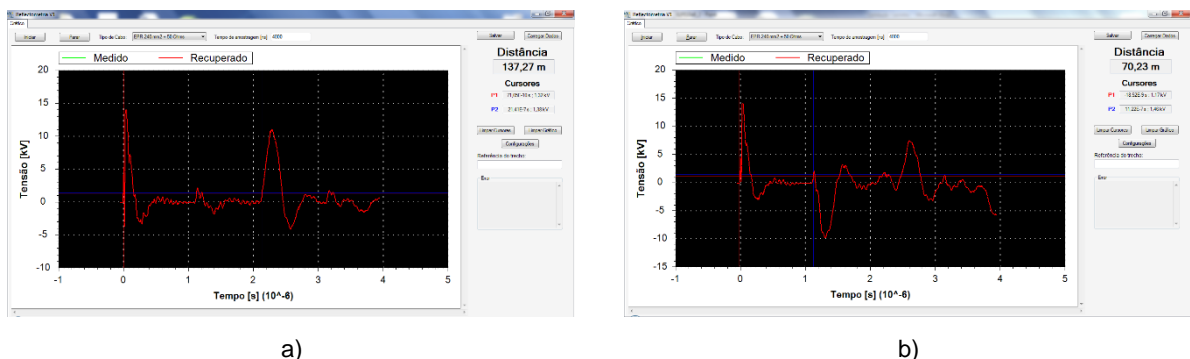


Figura 15. a) Reflectograma dos cabos XLPE (400 mm<sup>2</sup>) emendados, totalizando 138 metros e b) Reflectograma dos cabos XLPE (400 mm<sup>2</sup>) emendados, totalizando 138 metros, com defeito ativado na emenda.

Assim como em laboratório, os testes de campo mostraram que a técnica de reflectometria com pulso de alta tensão é efetiva na localização de defeitos. Os testes de campo também permitiram validar o protótipo desenvolvido. Para as medidas realizadas o erro na localização de defeitos ficou na faixa de 2%.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram aplicados experimentos e efetuadas análises que demonstraram a possibilidade caracterizar, ativar e localizar defeitos presentes em cabos isolados de média tensão, com isolamento em XLPE e EPR, de variadas seções transversais e comprimentos. A comprovação da possibilidade de aplicação de pulso único de alta tensão para ativação e localização de defeitos resultou em um aparato experimental com complexidade reduzida, se comparado à técnica de pulsos acoplados que necessita de sistemas integrados de geração de pulsos com diferentes características elétricas. Destaca-se esta nova forma de aplicar a TDR como inovação, tendo em vista que os equipamentos comercializados que aplicam esta técnica não a utilizam dessa forma, impactando em sua complexidade e custo.

A adequação e ajuste destes experimentos permitiram elaborar o protótipo de um sistema pronto para ser aplicado em campo, tendo em vista a sua efetiva validação em laboratório e em campo.

Além da localização de defeitos este sistema se mostrou sensível para detecção de emendas, permitindo as

equipes de manutenção aplicá-lo também para mapear e caracterizar redes. Esta condição pode se mostrar interessante uma vez que um banco de dados do estado da rede auxilia no processo de detecção de defeitos ou averiguação do seu estado de degradação.

Os erros de localização podem ser reduzidos de acordo com o aumento da experiência do operador, uma vez que este é que seleciona, por meio de cursores pontos no pulso incidente e refletido que determinam, a distância de localização do defeito. Com erros de localização menores que 3,5%, este protótipo está pronto para ser aplicado em cabos XLPE e EPR de 50, 240 e 400 mm<sup>2</sup>, e comprimentos de até 500 metros.

Com a entrega do protótipo à concessionária pretende-se obter dentro de pouco tempo um *feedback* sobre a utilização em campo e em seguida aplicar melhorias no projeto a fim de que este protótipo entre na fase da cadeia de inovação denominada de cabeça de série.

## 8. AGRADECIMENTOS

Este projeto foi concebido com recursos do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento cadastrado sob o número CEMIG-D378 do Programa de P&D da Agencia Nacional de Energia Elétrica em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais CEMIG, dessa forma a equipe de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento Lactec agradece pela viabilização que estas instituições proporcionaram.

O Lactec agradece Também a Companhia Paranaense de Energia – COPEL por permitir utilizar o laboratório de cabos subterrâneos do polo Atuba localizado em Curitiba para validação do sistema.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

J. M. Filho, *Manual de equipamentos elétricos*, 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

Agilent Technologies, *Time Domain Reflectometry: Theory*, 2013.

R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica*, vol. 1. LTC/EFEL. Rio de Janeiro, 1977.

S. W. Wentworth, *Eletromagnetismo aplicado, abordagem antecipada das linhas de transmissão*. Porto Alegre. Bookman, 2009.

L. A. Dissado, and J. C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, London: Peter Peregrinius, 1992.

F. Piazza, “Avaliação do estado de envelhecimento do sistema isolante papel-óleo e cabos extrudados em XLPE, utilizando a técnica de tensão de retorno,” Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

A. Rusek., S. Ganesan, B. Oakley, and D. Aloï, “Time-Domain Reflectometry (TDR) in Graduate Courses,” ASEE North-Central Section Conference, 2012.

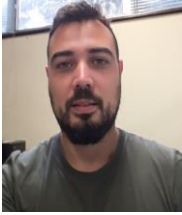
C. Svensson, and G. E. Dermer, “Time Domain Modeling of Lossy Interconnects,” IEEE Trans. on Advanced Packaging, vol. 24, n. 2, pp. 191-196, 2001.

USSUNA, D. A. Desenvolvimento de Sistema de Localização de Falhas em Cabos Isolados. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2014.

USSUNA D.A., et. al. Sistema de Detecção de Falhas em Cabos Isolados. XI IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2014. Juiz de Fora, Minas Gerais. 2014.



## DADOS BIOGRÁFICOS



DANIEL DE ANDRADE USSUNA possui mestrado em Engenharia Elétrica área de concentração Instrumentação Eletrônica pela Universidade Federal do Paraná (2014) e graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações pela Universidade Federal do Paraná (2011). Possui experiência teórica e prática nas áreas de Medidas Elétricas em Altas Frequências, Instrumentação Eletrônica, Simulação Numérica, Programação, Microeletrônica, Microcontroladores, Desenvolvimento e Otimização de Projetos Eletrônicos Analógicos e Digitais relacionados a Instrumentação e Controle, além de Sistemas Elétricos de Transmissão e Distribuição de Potência.

(2) RENATTO VAZ CARVALHO possui graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em eletrônica pela Universidade Federal do Paraná (2015) e mestrado em Engenharia Elétrica (2017) pela mesma instituição. Atualmente é Pesquisador nos institutos Lactec, onde desenvolve instrumentação eletrônica para ensaios de diagnóstico em materiais. Possui experiência em simulação e desenvolvimento de circuitos eletrônicos, além de programação em baixo e alto nível. Também possui experiência como docente, tendo trabalhado como professor nos cursos de Engenharia Elétrica e tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas.

(3) VITOLDO SWINKA FILHO Possui graduação em Bacharelado em Física pela Universidade Federal do Paraná (1992), mestrado em Física pela Universidade Federal do Paraná (1996) e doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais pela Universidade Federal do Paraná (2000). Atualmente é Pesquisador Consultor do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento LACTEC e Professor Adjunto do Departamento de Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais, com ênfase em Propriedades Elétricas, atuando principalmente nos seguintes temas: materiais dielétricos, instrumentação eletrônica, radiografia e tomografia de raios X aplicada a materiais.

(4) VICTOR SALVINO BORGES Pesquisador no LACTEC a mais de 10 anos, com graduação e mestrado em engenharia elétrica pela UFPR. Engenheiro de segurança do trabalho pela UTFPR. Atua em projetos de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de robótica aplicada a manutenção, desenvolvimento de ferramentas e metodologias para atividades com rede energizada.

(5) GUILHERME CUNHA DA SILVA Graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela FURB/SC (1997), mestrado e doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais UFPR/PR (2000 e 2005). Atuação como Pesquisador Sênior e professor do Mestrado Profissionalizante do Lactec nos seguintes temas: (i) avaliação e diagnóstico de envelhecimento/degradação de sistemas de isolamento de equipamentos elétricos utilizados no sistema elétrico, (ii) desenvolvimento de metodologias para controle de qualidade de materiais de redes de distribuição; (iii) desenvolvimento de metodologias para manutenção de cabos isolados e (iv) desenvolvimento de novos materiais aplicados ao setor elétrico. Atualmente é Gerente de P&D na Área de Materiais do Lactec.