

Experimento Prova de Conceito de Propagação de Pulso Elétrico Para Detecção de Cargas Clandestinas em Modelo de Linha de Distribuição em Escala Reduzida

Leandro Coqueiro Silva¹
Ricardo Cerqueira Medrado¹
Davi Franco Rêgo²
Lucas Costa Mendes¹
Fernando Augusto Moreira^{1,3}
Jorge Eduardo Soto Marambio¹
¹Norsul Engenharia e Consultoria
²Instituto Federal da Bahia
³Universidade Federal da Bahia
Salvador, Brasil
norsul@norsulengenharia.com.br

Krystyanny da Rocha Cavalcanti¹
Edmilson de Lima Santos¹
Marcus Vinícius de Carvalho Santos¹
¹Eletrobras Distribuição Alagoas
Maceio, Brasil
krystyanny.cavalcanti@ceal.com.br

Resumo — A reflectometria no domínio do tempo (TDR) é uma técnica geralmente utilizada para identificação de defeitos em cabos de linhas de transmissão e cálculos para identificação da localização de faltas nestas linhas. A proposta deste artigo é apresentar resultados de testes de conceito visando a localização de pontos de conexão de cargas clandestinas em linhas de distribuição de média tensão a partir da reflectometria no domínio do tempo, utilizando um modelo em escala reduzida, baixa tensão e linha desenergizada. Os resultados dos estudos estabeleceram um ponto de partida para desenvolvimento futuro de equipamentos e métodos de detecção remota de conexões ilegais em redes de distribuição.

Palavras chave -- Cargas Clandestinas, Distribuição, Propagação de Pulso, Reflectometria.

I. INTRODUÇÃO

A reflectometria no domínio do tempo (TDR) é uma técnica comumente utilizada para identificação de defeitos em cabos de linhas de transmissão e para localização de faltas nestas linhas [1]. Esta técnica consiste em enviar um pulso elétrico conhecido e observar as suas reflexões que ocorrem nas interfaces entre duas regiões de diferentes impedâncias. A característica do pulso refletido traz a informação do tipo de defeito que ocorre no cabo.

Qualquer diferença de impedância na linha causa uma reflexão. Um equipamento de TDR instalado em uma linha em operação tem a capacidade de injetar pulsos e mapear o padrão de reflexões, alimentando um banco de dados. A partir destes dados, um sistema microprocessado pode avaliar o banco para identificar conexões e ramificações nesta linha [2].

Visando explorar outras aplicações para a reflectometria no Domínio do Tempo, foi elaborado um estudo, dentro de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento do programa ANEEL

intitulado “*Identificação Remota de Perdas Comerciais com Cargas Rurais Móveis – Blindagem de Áreas Críticas fundamentada em conceitos de Smart grid e modelo de ondas trafegantes para monitoramento de linhas*”, executado pela Fundação Escola Politécnica da Bahia, com apoio técnico da Norsul Engenharia e Consultoria e apoio financeiro da Eletrobras Distribuição Alagoas. O estudo, do qual resultou o presente artigo, consistiu na realização de testes de conceito com intuito de identificar ligações clandestinas em linhas de distribuição de média tensão a partir da reflectometria no domínio do tempo.

Durante o desenvolvimento do projeto foram realizadas simulações computacionais e experimentos laboratoriais. Nos experimentos foram utilizados microcontroladores, geradores de função, osciloscópios e condutores elétricos.

Os resultados da pesquisa estabelecem um ponto de partida para o desenvolvimento do modelo conceitual de um equipamento e de um método necessários para a realização da reflectometria aplicada à detecção de conexões clandestinas em redes de média tensão.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A técnica da reflectometria no domínio do tempo é comumente utilizada no âmbito das telecomunicações para medição de impedância de cabos, comprimento e detecção de faltas de diversos tipos. Em instalações elétricas de distribuição que utilizam condutores subterrâneos, a técnica também é bastante aplicada para localização de defeitos como circuito aberto, curto-circuito, emenda, rachadura *etc.*

A TDR consiste no envio de um pulso de curta duração e observância das reflexões que ocorrem nas interfaces entre regiões de diferentes impedâncias de um circuito. Desta forma, os tipos de defeitos podem ser estimados a partir da

forma e intensidade do sinal refletido [2].

Na avaliação das características do pulso refletido destacam-se os três casos de maior relevância: circuito aberto, curto circuito e perfeito casamento de impedância, conforme mostrados na Tabela I [3].

Tabela I – Representação esquemática comparativa entre pulso de entrada e pulso refletido para diversas impedâncias.

Impedância característica do cabo (Z_0)	Impedância da carga (Z_L)	Característica do pulso de entrada	Característica do pulso refletido
Z_0	$Z_L \rightarrow \infty$		
Z_0	$Z_L \rightarrow 0$		
Z_0	$Z_L = Z_0$		

$Z_0 \rightarrow$ impedância característica do cabo;
 $Z_L \rightarrow$ impedância da carga.

O primeiro caso da Tabela 1, onde é mostrada a reflexão para $Z_L \rightarrow \infty$, representa um exemplo de pulso injetado em condutores com terminação livre, onde o pulso refletido retorna sem inversão de fase, o que ocorre em casos de ruptura de cabos. O segundo caso, com $Z_L \rightarrow 0$, representa um exemplo de condutor com terminação em curto-circuito, onde o pulso retorna com inversão de fase. No terceiro caso, a reflectometria não apresenta pulso refletido devido a $Z_L = Z_0$ o que está de acordo com o teorema da máxima transferência de potência [3].

Para a determinação da posição do defeito, utiliza-se o tempo decorrido a percepção do pulso de entrada e do pulso refletido, conforme se observa na Figura 1 [3].



Figura 1. Tempo entre o pulso de entrada e o pulso refletido.

Para a determinação do espaço percorrido pelo pulso, multiplica-se a velocidade de propagação pelo tempo de reflexão. Se o pulso é injetado no início do cabo e refletido no final, deve-se observar que o tempo de reflexão corresponde ao necessário para percorrer o comprimento do cabo duas vezes. Nesse caso deve-se dividir o tempo pela metade para encontrar a posição do defeito [3].

Embora a determinação da distância pareça ser simples, a principal dificuldade consiste em definir a velocidade de propagação v do sinal propagado. Tal velocidade pode variar com a frequência, as propriedades do cabo e com o modo de injeção do sinal no cabo. Na prática, a velocidade de propagação do cabo é geralmente definida como um percentual da velocidade da luz e pode ser calculada ou medida em um modelo de linha de transmissão [2].

Nesse sentido, além de ser possível obter o comprimento do cabo, a reflectometria no domínio do tempo também fornece um diagnóstico do tipo de problema que possa estar acontecendo com o cabo, através do formato da onda refletida [4]. Na Figura 2 observamos as formas de onda típicas para os principais eventos.

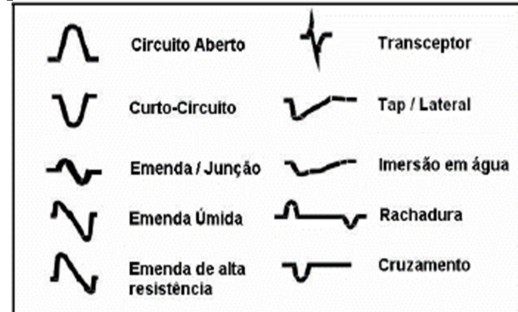


Figura 2. Formas típicas das ondas refletidas na reflectometria no domínio do tempo [4].

Assim, o método TDR pode identificar facilmente circuitos abertos e curtos circuitos, por exemplo, devido à elevada mudança de impedância e, portanto, à grande intensidade da onda refletida. Por outro lado, variações menores da impedância, como conexões e ramificações ao longo do cabo, são mais difíceis de serem identificadas, já que as reflexões provenientes das emendas são também de menores amplitudes e variadas formas [2].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Para comprovação da viabilidade da técnica proposta de detecção de cargas clandestinas em linhas de distribuição foram realizadas simulações computacionais e experimentos reais, a partir de duas fontes distintas de sinais.

A. Simulações Computacionais

O software *Multisim 13* foi utilizado para a realização de simulações preliminares do fenômeno de reflexão de ondas e caracterização de cargas autorizadas e clandestinas em uma rede de distribuição. O modelo simplificado, mostrado na Figura 3, exibe três consumidores C1, C2 e C3 (simplificados por resistores) derivados da linha que possui os trechos T1, T2 e T3. O ponto de medição é indicado pelo osciloscópio (OSC), que está ligado após o gerador de pulso, que possui resistência interna R . Os efeitos capacitivos foram inicialmente desprezados, devido à dificuldade de reproduzi-los nos experimentos em modelo reduzido. As Tabelas II e III apresentam os parâmetros utilizados na simulação.

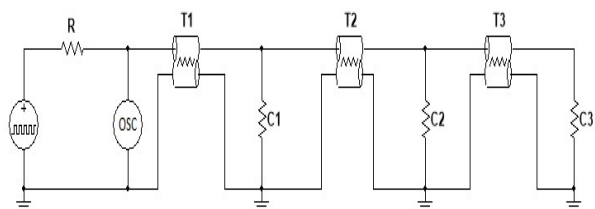


Figura 3. Esquemático de simulação da linha com as derivações.

A Figura 4 mostra o resultado do transitório no domínio do tempo correspondente aos parâmetros de simulação das

tabelas II e III. O gráfico mostra o pulso emitido pela fonte e as reflexões referentes às cargas conectadas.

Tabela II – Parâmetros de linha e consumidores utilizados na simulação.

Simulação	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3
Comprimento (m)	10	25	15
Resistência (Ω/m)	0,043	0,043	0,043
Indutância (H/m)	0,00001	0,00001	0,00001
Consumidores	C1	C2	C3
Carga (Ω)	100	100	100

Tabela III – Parâmetros da fonte emissora de pulsos utilizados na simulação.

Fonte do pulso	
Tensão	50V
Largura do Pulso	20ns
Período	10ms
Tempo de subida	0,1ns
Tempo de descida	0,1ns
Resistência	1k Ω

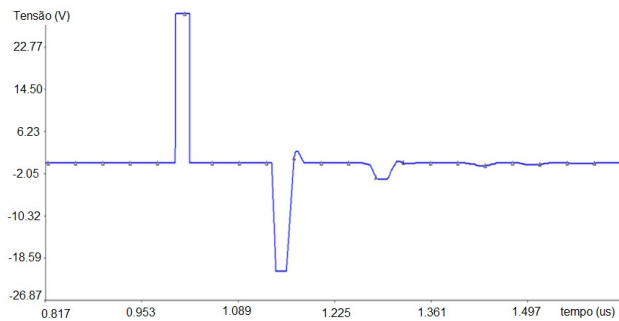


Figura 4. Resultados da análise transitória no domínio do tempo.

B. Experimentos de laboratório.

Tendo sido comprovada a viabilidade da técnica a partir das simulações computacionais, a técnica passou a ser testada em experimentos de laboratório.

O experimento “propagação de pulso” consistiu na injeção de pulso em um cabo de 50 metros com cargas distribuídas ao longo da linha. Um osciloscópio foi conectado em paralelo à fonte geradora do pulso para registro da propagação e reflexão dos pulsos. Foi adotado como primeira fonte de pulso um microcontrolador da fabricante NXP (*Mbed*), que, em seguida, foi substituído por um gerador de sinais de bancada da fabricante *Agilent*. O osciloscópio registrou os instantes de tempo do pulso emitido e dos pulsos refletidos. Assim, com a diferença entre os tempos, foi possível determinar a localização das origens das reflexões.

B.1. Utilização de microcontrolador como gerador de pulsos.

O equipamento inicialmente utilizado para fornecer pulsos foi o microcontrolador *Mbed* LPC1768 da NXP. Esse microcontrolador possui frequência máxima de processamento igual a 96Mhz. Apesar da alta frequência de processamento,

os pulsos gerado pelo equipamento, quando observados pelo osciloscópio da Tektronix, modelo TBS1052B, apresentaram amplitude de 3,3V e largura de pulso mínima de 3,4 μ s, como pode ser visualizado na Figura 5.

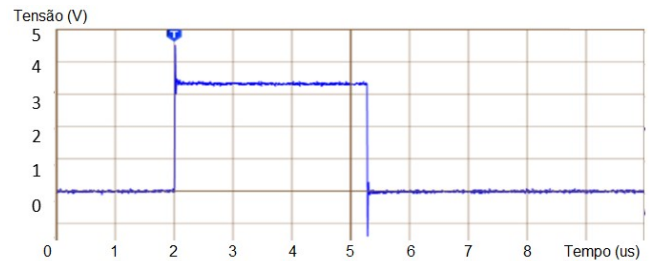


Figura 5. Pulso fornecido pelo *Mbed*.

No experimento, a saída do microcontrolador e o osciloscópio foram conectados em paralelo com uma linha constituída por duas vias de condutores de 50m cada, com seção transversal de 2,5mm², AWG 12, de forma que o pulso pudesse propagar e ser refletido em eventuais descontinuidades.

O pulso com as características daquele fornecido pelo *Mbed* foi utilizado para a realização de simulações no *Multisim* em diferentes cenários: com diferentes cargas no final da linha, em curto, aberto, com e sem ramificações.

B.2. Utilização de gerador de sinais de bancada

Devido às limitações de tempo de resposta do microcontrolador utilizado na primeira etapa do experimento (e grande largura de pulsos), a fonte de pulsos elétricos foi substituída por outra que pudesse gerar pulsos mais estreitos.

Assim, o microcontrolador foi substituído pelo gerador de sinais *Agilent* modelo 33220A que possui capacidade de geração de pulsos com largura mínima de 30ns (Figura 6) e tempo de subida de 4ns. Os sinais gerados foram analisados pelo osciloscópio também *Agilent*, modelo DSO1102B com frequência de aquisição de 500MHz. Estes equipamentos foram disponibilizados pelo Laboratório de Propriedades Ópticas da Universidade Federal da Bahia – LAPO-UFBA.

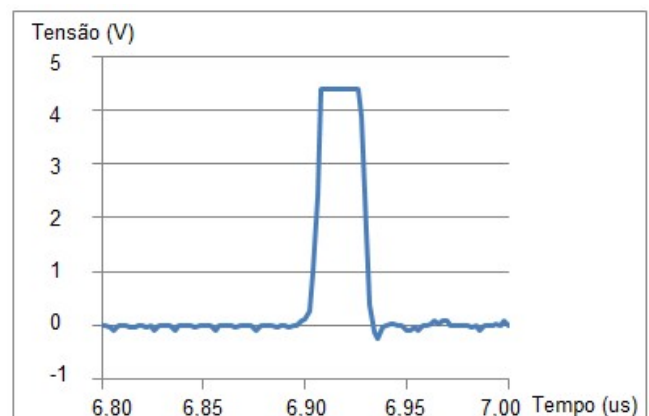


Figura 6. Pulso fornecido pelo gerador de funções *Agilent*.

Nesta etapa do experimento os equipamentos foram ligados em paralelo com a linha, constituída por duas vias de

condutores de 50m cada. Na linha, foram inseridas derivações que simulam cargas de consumidores conforme esquemático da Figura 3. Cada carga inserida apresentou uma reflexão característica para os pulsos injetados, o que foi observado pelo osciloscópio.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Resultados das simulações e primeiro experimento

As simulações preliminares no *Multisim* comprovaram que as cargas conectadas ao longo da linha ocasionam reflexões do pulso emitido e, através do instante de tempo dessas reflexões, foi possível determinar a distância entre o ponto de emissão e o ponto de conexão desta carga. Com o pulso fornecido pelo microcontrolador foram realizados os primeiros experimentos, segundo a metodologia apresentada na seção III.

No experimento, a montagem em terminação aberta e sem cargas intermediárias apresentou o resultado no osciloscópio que pode ser visualizado na Figura 7.

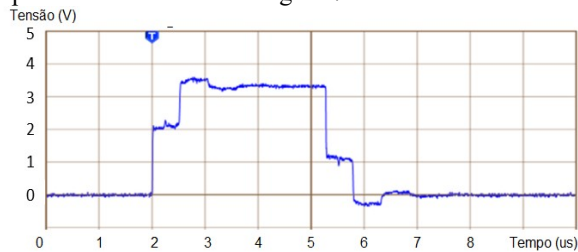


Figura 7. Sem ramificações e aberto no final.

Observa-se que a primeira reflexão retorna ao ponto de origem 500ns após a emissão do pulso. Considerando o comprimento do cabo (50m) e a velocidade de propagação do pulso ($2 \times 10^8 m/s$ – velocidade medida no experimento e simulação), pode-se concluir que tal reflexão foi gerada pela impedância infinita do final da linha (circuito aberto).

Como os pulsos emitidos possuem largura na ordem de microssegundos e os tempos de reflexão na ordem de nanossegundos, os pulsos emitidos e refletidos se sobrepõem.

Aplicando um curto no final do cabo observa-se que ocorre uma reflexão no mesmo instante de tempo do condutor em aberto, como visto na Figura 7, entretanto, com inversão de fase, como mostrado na Figura 8, levando à subtração entre os pulsos inicial e refletido.

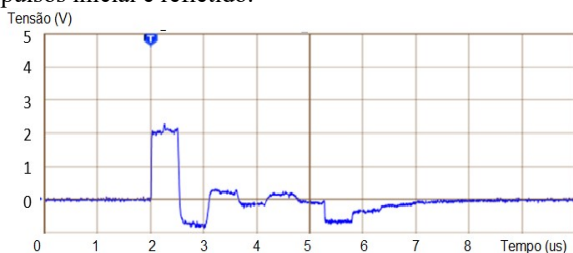


Figura 8. Circuito em curto.

Para representar os consumidores em uma linha de distribuição, foram acrescentadas cargas resistivas ao longo do condutor, através de pequenas ramificações de comprimento desprezível.

Acrescentando uma carga de $1k\Omega$ em 25 metros no cabo com terminal aberto, observa-se que o primeiro pulso refletido

identificado no osciloscópio ocorre em 250ns após a emissão conforme visualizado na Figura 9. Tais resultados são condizentes com os resultados da simulação no *Multisim* apresentados nas Figuras 10 e 11.

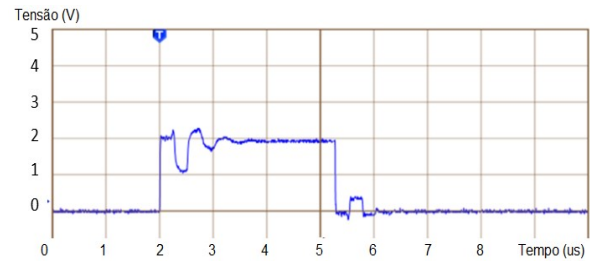


Figura 9. Resultado osciloscópio - Ramificação em 25 metros.

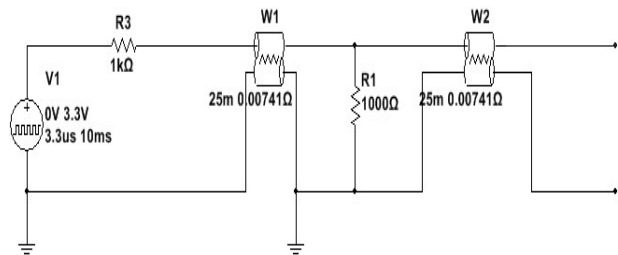


Figura 10. Esquemático *Multisim* – Ramificação em 25 metros.

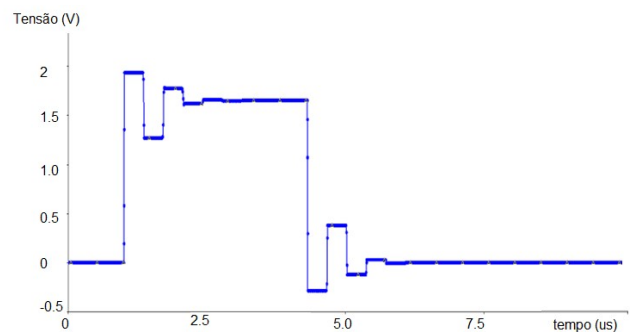


Figura 11. Resultado simulação *Multisim* - Ramificação em 25 metros.

A teoria de propagação e reflexão do pulso é comprovada pelo experimento com o microcontrolador. Entretanto, a largura do pulso emitido por esta fonte é maior do que o tempo de propagação do pulso na linha, sobrepondo assim o pulso emitido pelos pulsos refletidos. Desta forma, ao acrescentar diversas cargas ao longo do condutor uma série de pulsos refletidos se sobrepõem impossibilitando a precisão na leitura do tempo da reflexão, portanto, desqualificando o equipamento como gerador de pulsos para a aplicação pretendida.

B. Resultados do segundo experimento

Devido às limitações apresentadas pelo experimento anterior, passou-se a utilizar o gerador *Agilent* para injetar pulsos mais estreitos na linha e ter uma maior precisão para identificar e caracterizar os pulsos refletidos pelas cargas.

O primeiro teste utilizando estes equipamentos consistiu na injeção de pulso no condutor com terminação aberta e sem cargas conectadas. Os resultados são apresentados na Figura 12.

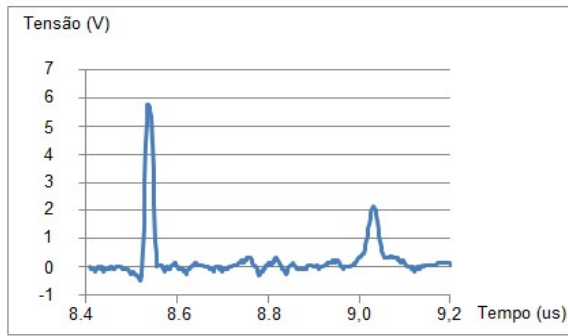


Figura 12. Gráfico resultante do cabo aberto no final.

O segundo teste utilizou o condutor com terminação em curto e sem cargas conectadas. Os resultados são apresentados na Figura 13.

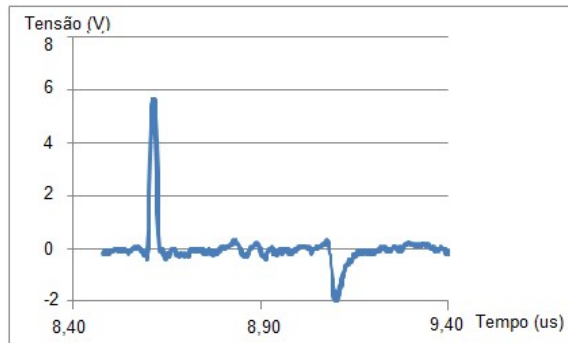


Figura 13. Gráfico resultante do cabo em curto no final.

Os resultados das Figuras 12 e 13 condizem com os resultados esperados segundo as teorias de reflectometria [3]. Observa-se que, quando a impedância tende ao infinito (circuito aberto), o pulso refletido está em fase com o incidente, e, quando a impedância tende a zero (curto-circuito), ocorre a inversão da fase do pulso incidente, no momento da reflexão.

Para identificar a origem da carga que provoca a reflexão, é utilizada a Equação I, que determina a distância do medidor à carga através dos tempos de identificação dos pulsos emitido e refletido.

$$d = \frac{t_2 - t_1}{2} \times v \quad (1)$$

Onde,

d – distância entre o ponto de medição e a carga;

t_1 – tempo de detecção do pulso emitido;

t_2 – tempo de registro do sinal refletido;

v – velocidade de propagação do pulso elétrico na linha.

Para o caso do cabo sem cargas, a reflexão só ocorre no final da linha. Como o comprimento do cabo é conhecido, podemos calcular a velocidade de propagação através dos instantes de tempo t_1 e t_2 :

$$t_1 = 8,536\mu s$$

$$t_2 = 9,03\mu s$$

$$v = 2,016129032 \times 10^8 m/s$$

Esta velocidade de propagação equivale a 67,2% da velocidade da luz. Tal velocidade varia de acordo com as propriedades do cabo, principalmente sua impedância, e do pulso emitido. Substituindo os valores de t_1 , t_2 e v em (1):

$$d = \frac{9,03\mu s - 8,536\mu s}{2} \times 2,016129032 \times 10^8 m/s$$

$$d = 49,7984m \approx 50m$$

A distância calculada em (1) é aproximadamente igual ao comprimento do cabo onde foi injetado o pulso.

Após os testes com condutor em aberto e curto-circuito, diversas cargas foram conectadas ao longo da linha para, através da reflexão dos pulsos, identificar as distâncias onde foram feitas as conexões. Distribuindo as cargas de 100Ω em 10m, 35m e 50m, o resultado é apresentado na Figura 14.

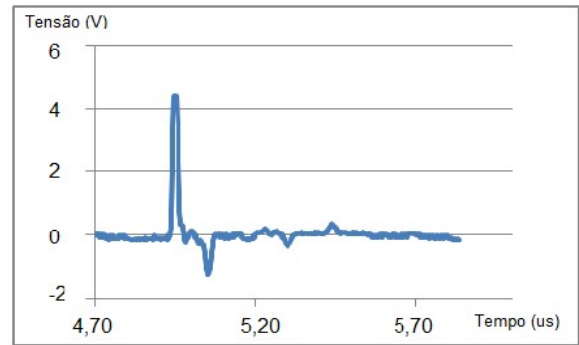


Figura 14. Gráfico resultante das ramificações em 10m, 35m e 50m.

Analisando o gráfico da Figura 14 é possível constatar pulsos nos instantes de tempo necessários para a onda percorrer a linha e refletir nas cargas dispostas nas distâncias de 10, 35 e 50 metros. É possível perceber, ainda, um pequeno ruído, logo após a visualização do pulso incidente. Este ruído se deve à falta de casamento de impedância que ocorre na conexão entre o gerador de sinais e o cabo utilizado para representar a linha de distribuição.

Através de um simples tratamento matemático nos dados do gráfico da Figura 14 (aplicação de módulo e filtro de limiar nos sinais) é possível filtrar os ruídos de baixa amplitude, para tornar as reflexões provenientes de cargas mais visíveis, como mostrado na Figura 15.

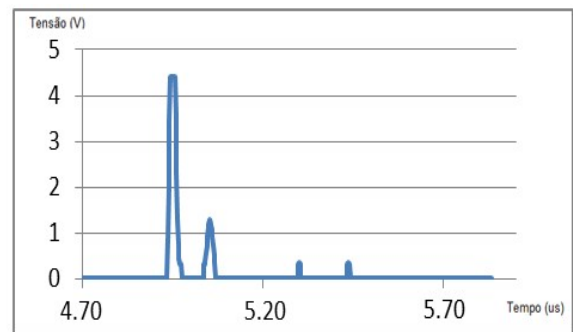


Figura 15. Gráfico modulado.

Como o estudo de identificação de cargas clandestinas depende apenas da localização dos tempos de chegada dos picos dos sinais refletidos, é possível aplicar a primeira derivada para identificar apenas os instantes dos picos relativos do gráfico da Figura 15 ($dV/dT=0$), para simplificar a análise, conforme pode ser visto na Figura 16.

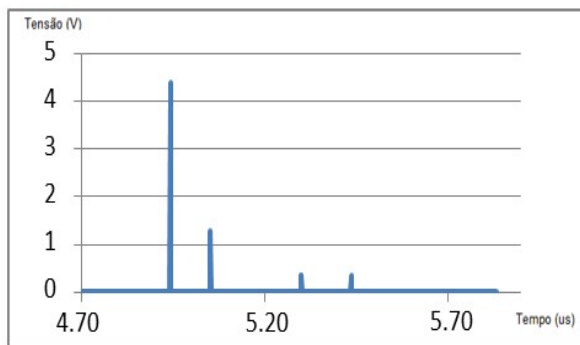


Figura 16. Instante dos picos.

Distinguindo apenas os pulsos fica mais fácil identificar que o primeiro sinal é referente ao pulso emitido pelo gerador e os outros três são decorrentes das reflexões das cargas conectadas em 10, 35 e 50 metros respectivamente, aplicando a fórmula (I).

$$t_1 = 4,942\mu s$$

$$t_2 = 5,052\mu s$$

$$t_3 = 5,3\mu s$$

$$t_4 = 5,436\mu s$$

$$d_1 = \frac{5,052\mu s - 4,942\mu s}{2} \times 2,016129032 \times 10^8 m/s = 11,09m$$

$$d_2 = \frac{5,3\mu s - 4,942\mu s}{2} \times 2,016129032 \times 10^8 m/s = 36,09m$$

$$d_3 = \frac{5,436\mu s - 4,942\mu s}{2} \times 2,016129032 \times 10^8 m/s = 49,8m$$

V. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados em todos os experimentos realizados demonstram a viabilidade na aplicação do método da reflectometria no domínio do tempo para identificação de cargas clandestinas ao longo da linha. Para isto, contudo, é necessário que o operador tenha o conhecimento das distâncias entre os consumidores regulares e que a linha não tenha muitas ramificações, para simplificar a análise dos diagramas de *lattice*.

As pequenas diferenças entre a distância real presumida e a distância calculada a partir dos tempos aferidos se deve à erros na medição da distância de disposição das cargas. Mesmo considerando estas distorções, o erro máximo foi de 1,09 metros, o que corresponde a aproximadamente 2% do comprimento do condutor analisado.

É importante observar que as limitações apresentadas no primeiro experimento se devem às reduzidas dimensões do modelo simplificado utilizado. Em um cenário real, as

distâncias a serem consideradas entre consumidores são de dezenas de metros (para áreas urbanas) ou centenas de metros a quilômetros (para áreas rurais).

Vale ressaltar que em todos os casos o pulso incidente deve conter energia suficiente para que suas reflexões sejam detectadas no ponto de medição. Como a largura do pulso deve ser modulada de acordo com as limitações do comprimento do cabo, os pulsos devem possuir altas amplitudes para carregar grandes quantidades de energia.

Isto ocorre porque a cada descontinuidade (mudanças de impedância) parte do sinal é refletido, parte absorvido e parte refratado, assim, quanto maior o número de ramificações, menor a probabilidade de identificar as reflexões provenientes de cargas distantes.

O experimento também comprovou que é mais fácil identificar as reflexões resultantes de elevadas mudanças de impedância, como terminações em circuito aberto ou curto-circuito, pois a reflexão da onda ocorre com maior intensidade (maior coeficiente de reflexão). As reflexões provocadas por cargas de impedância próximas à da linha geralmente possuem baixa intensidade, e são mais difíceis de serem identificadas.

Assim, os estudos demonstraram a viabilidade técnica da aplicação das técnicas de TDR para identificar a conexão ilegal de cargas ao longo de uma linha de distribuição, principalmente em meio rural. Com isto, abre-se caminho para o desenvolvimento de equipamentos e métodos mais eficazes e econômicos para combate às perdas não técnicas das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Para aplicação em campo, entretanto, a injeção de pulso ainda esbarra em questões técnicas operacionais, pois os equipamentos referentes à médio-alta tensão em linhas energizadas para tornar possível este método não são facilmente encontrados no mercado. Os equipamentos com classe de isolamento 13,8kV geralmente não possuem capacidade de chaveamento rápido o bastante para injetar pulsos de pequena largura.

Desta forma, os estudos devem prosseguir no sentido de desenvolver equipamentos adequados para aplicação deste método em linhas energizadas, possibilitando o teste da técnica em uma área piloto de uma concessionária distribuidora de energia elétrica.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] S. S. Abreu. Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Aéreas pelo Método das Ondas Viajantes Utilizando Filtros Digitais e Transformada Wavelet.
- [2] Q. Shi, U. Troeltzsch, O. Kanoun, Detection and Localization of Cables Faults by Time and Frequency Domain Measurements. 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2010.
- [3] R. Paludo. Reflectometria no Domínio do Tempo: Análise do Efeito das Camadas Semicondutoras de Cabos Isolados. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná, 2009;
- [4] F. Araújo. O. Detecção de Falta à Terra no Serviço Auxiliar em Corrente Contínua das Subestações de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado em Metrologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2004;