

Identificação de Irregularidades em Ramais de Ligação e Medidores de Energia Utilizando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

Guilherme E. M. Campos*, Miguel B. Bessa**, Jhonatan V. M. Corrêa**, André Luiz D. Lima***, Jessica Tiemi Takeuchi***, Luiz Fernando Arruda**, Mário Cesar M. de F. Souza***, Tales F. B Souza***

**Concert Technologies, Belo Horizonte, Brasil (e-mail: guilherme.campos@concert.com.br)*

***Concert Technologies, Belo Horizonte, Brasil*

****CPFL Energia, Campinas, Brasil.*

Abstract: This paper refers to the ANEEL R&D Project DE3064 – Traceability and Inspection Management Platform Through Artificial Intelligence Techniques, celebrated between CPFL Energia and Concert Technologies wherein the main objective is to develop a solution to assist the inspection teams to detect irregularities in the grid and in energy meters by the means of a hardware and an application that use Signal Processing and Artificial Intelligence techniques. Among the employed Signal Processing techniques, there is the Time Domain Reflectometry (TDR), wherein, analyzing reflected high frequency signals, is it possible to identify potential irregular deviation between the meter and the consumer unit and modifications in the circuit of electronic energy meters. The paper shows the first results of the development of the hardware, including the equipment project specification and architecture and the response obtained in the solution validation tests.

Resumo: O trabalho apresentado refere-se ao projeto de P&D ANEEL DE3054 – Plataforma de Rastreabilidade e Gestão das Inspeções Através da Utilização de Técnicas de Inteligência Artificial, celebrado entre a CPFL Energia e a Concert Technologies e cujo objetivo consiste em desenvolver uma solução para auxiliar as equipes de inspeção a detectar irregularidades na rede e nos medidores de energia por meio de um *hardware* e uma aplicação que empregam técnicas Processamento de Sinais e de Inteligência Artificial. Dentre as técnicas de processamento de sinais utilizadas, está a Reflectometria no Domínio do Tempo (em inglês, *Time-Domain Reflectometry* – TDR), em que, a partir da análise do reflexo de sinais de alta frequência injetados na rede ou no medidor de energia pode-se identificar a presença de derivações irregulares entre o medidor e a unidade consumidora e alterações no circuito elétrico de medidores de energia eletrônicos. O trabalho apresenta os resultados iniciais do desenvolvimento do *hardware*, com o projeto e arquitetura do equipamento e respostas dos testes de validação da solução.

Keywords: Non-Technical Loss; Revenue Protection; Time-Domain Reflectometry; Signal Processing; Inspection.

Palavras-chaves: perdas não técnicas; proteção à receita; Reflectometria no Domínio do Tempo; Processamento de Sinais; Inspeção.

1. INTRODUÇÃO

O funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP) de um país influencia diretamente a economia e a qualidade de vida da população. Assim, é fundamental que todos seus processos aconteçam de forma eficiente, confiável e econômica. Um dos fatores que afetam diretamente o desempenho do funcionamento do SEP diz respeito às perdas que se tem em todo o sistema.

As perdas podem ser classificadas em técnicas e não técnicas (ou comerciais). As perdas técnicas são inerentes ao funcionamento do SEP, pois parte da energia é dissipada no processo de transporte, transformação de tensão, perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas e medição em decorrência da física dos componentes do sistema elétrico. Todas as outras perdas são consideradas não técnicas (Ferreira, 2015). Segundo (ANEEL, 2019), as perdas comerciais podem

ultrapassar 30% de toda energia fornecida em algumas regiões do Brasil.

Mesmo que inspeções sejam realizadas de forma frequente pelas concessionárias ou empresas terceirizadas, muitas das vezes as irregularidades podem passar despercebidas, já que grande parte delas não está exposta às equipes de inspeção. Adicionalmente, o processo tradicional de inspeção ainda é oneroso para as concessionárias (Penin, 2008), aumentando ainda mais o impacto financeiro dessas perdas para as concessionárias.

Diversos projetos e trabalhos acadêmicos realizados anteriormente propõem diferentes soluções que auxiliam no aumento da eficiência dos resultados das inspeções para identificação de irregularidades.

O trabalho (G.H. Shirkoohi, 2010) tem por objetivo utilizar a técnica Reflectometria no Domínio do Tempo (em inglês, *Time-Domain Reflectometry* – TDR) para monitorar a

qualidade do cabeamento em aeronaves. Os testes utilizaram um gerador de sinais da Agilent (81134A 3.35 GHz) e outro coletor (semelhante a um osciloscópio, Agilent 4 GHz, 20GS/s Infinium - MSO9404A) conectado a um computador para identificar aberturas no isolamento do cabo coaxial de 6 metros do *setup* de teste. Os resultados obtidos conseguiram identificar os locais de corte no isolamento de forma precisa.

O projeto de P&D mostrado em (Neoenergia, 2015) propõe a criação de um dispositivo cabeça de série para indicar derivações em eletrodutos por meio de detecção de campos magnéticos. O equipamento portátil permite que as equipes de inspeção detectem as derivações sem necessitar injetar sinais na rede ou realizar intervenções nas construções.

O projeto de P&D descrito em (ANEEL, 2017) propõe o desenvolvimento de um equipamento para a identificação de falhas e derivações em cabos subterrâneos de baixa tensão da rede de distribuição. O escopo do trabalho está delimitado à utilização em cabos subterrâneos de baixa tensão, energizados ou não. A técnica utilizada é a Reflectometria no Domínio da Frequência (do inglês, *Frequency-Domain Reflectometry* FDR).

O dispositivo desenvolvido no trabalho apresentado em (Bazelatto, et al., 2005) é composto por um sensor de campo elétrico, um sensor de campo magnético e um sensor detector de metal que permitem detectar derivações na rede anterior aos medidores de energia.

O projeto descrito em (Eldorado, 2015) desenvolveu um sistema automático e não intrusivo de avaliação de medidores no campo.

O projeto de P&D (Poubarab, Alishahi, & Aghli, 2015) propõe a utilização de TDR para detectar furtos de energia na rede a partir da análise de possíveis desvios nela encontrados.

Diversos dispositivos de mercado, como Montrel ADR M2000, Montrel ADR 3000, Montrel ADR Multi4000 possuem algumas funções de ensaio de medidores em campo. Já os equipamentos Megger série T3090, Baur IRG 2000 e Mgger CFL510G utilizam a técnica TDR para identificar faltas (curtos-circuitos) em cabos e a distância em que se localizam.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados iniciais provenientes do hardware desenvolvido no escopo do projeto, cujo objetivo é desenvolver uma solução para auxiliar as equipes de inspeção a detectar irregularidades na rede e nos medidores de energia por meio de um *hardware* e um *software* (um aplicativo para *smartphone*) que empregam técnicas Processamento de Sinais e de Inteligência Artificial. Dentre as técnicas de processamento de sinais utilizadas, está a Reflectometria no Domínio do Tempo, em que, a partir da análise do reflexo de sinais de alta frequência injetados na rede ou no medidor de energia pode-se identificar a presença de derivações irregulares entre o medidor e a unidade consumidora e alterações no circuito elétrico de medidores de energia eletrônicos. O resultado esperado do projeto é uma melhoria na eficiência e taxa de acerto do processo de inspeção em campo para identificação de irregularidades, realizado pela concessionária e por suas equipes terceirizadas, e no aumento do retorno financeiro proveniente das irregularidades encontradas.

2. DESENVOLVIMENTO

Na primeira etapa do projeto, foi realizado o estudo dos conceitos, técnicas, equipamentos, patentes, projetos, metodologias, padronizações e procedimentos de detecção de irregularidades existentes no mercado e na academia, resultando em um relatório do Estado da Arte no que se refere à Proteção à Receita em concessionárias do Brasil e do mundo. Também foi realizado um diagnóstico do estado atual dos procedimentos de recuperação de energia no Grupo CPFL e um *benchmarking* com concessionárias brasileiras, reunindo informações de boas práticas e metodologias por elas empregadas. As etapas subsequentes do projeto consistem na especificação dos requisitos e definição da arquitetura da solução, validação das técnicas propostas (TDR e Aprendizado de Máquina, dentre outras), projeto de *hardware*, testes em laboratório, implementação dos módulos de *software*, integração com sistemas legados da CPFL, implantação e testes finais.

2.1 Arquitetura da Solução

A solução desenvolvida no projeto é composta por um *hardware* e uma aplicação executada em um *smartphone* utilizado pelas equipes durante a inspeção das Unidades Consumidoras (UCs). Cada um desses elementos que compõem a solução é subdividido em diversos módulos, como, no caso do *hardware*, o módulo de Detecção de Desvio na Rede e o módulo de Detecção de Irregularidades em Medidores, que utilizam a técnica TDR.

A principal função do *hardware* desenvolvido é realizar testes para detectar desvios de energia na rede e aferição de medidores de energia por meio da injeção de sinais de alta frequência. Já a aplicação tem por função detectar desvios na rede e irregularidades nos medidores por meio de técnicas de Inteligência Artificial (Aprendizado de Máquina). Além disso, a aplicação possui outras funcionalidades, interfaces com o usuário e se integra a sistemas da CPFL para receber informações neles persistidas e disponibilizar os resultados dos algoritmos e dados obtidos durante a inspeção.

O *smartphone* processa funcionalidades da aplicação e permite que imagens capturadas por ele ou por câmeras a ele associadas sejam disponibilizadas à aplicação para a realização dos tratamentos por meio dos algoritmos desenvolvidos. A integração com os sistemas CPFL é feita por meio de um Barramento de Microserviços CIM (do inglês, *Common Information Model*) que realiza a gestão da informação trocada entre a aplicação e os sistemas CPFL.

2.2 Hardware e Firmware

O sistema de *hardware* e *firmware* é capaz de identificar a descontinuidade do cabeamento que é introduzida ao se conectar uma derivação em paralelo à rede que conecta o transformador que alimenta uma determinada UC. Isso é feito por meio da técnica TDR, em que um sinal de alta frequência é injetado no ponto de conexão da rede com o medidor da UC e o reflexo do sinal injetado se altera caso haja uma mudança de perfil de impedância, proveniente da inserção dessa derivação. As restrições de resolução espacial implicam em

uma resolução temporal capaz de discernir variações de até 1 ns, o que, nas condições estimadas e comumente encontradas no cabeamento de conexão da rede com a UC, corresponde a um comprimento mínimo de detecção de aproximadamente 75 cm. O sistema de aquisição de dados é compatível com essa restrição, sendo definidas para o conversor analógico-digital (AD, ou, do inglês, *Analogic-Digital Converter* - ADC) um mínimo de 2 G amostras por segundo e interface JESD204, e para componente de processamento central um SoC (do inglês, *System on Chip*) capaz de lidar com dados a essa taxa. Para a geração do sinal, o pulso possui uma frente de onda rápida o suficiente, não maior do que 500 ps para atingir os requisitos de resolução definidos.

A arquitetura do *hardware* é detalhada no diagrama de blocos da Figura 1.

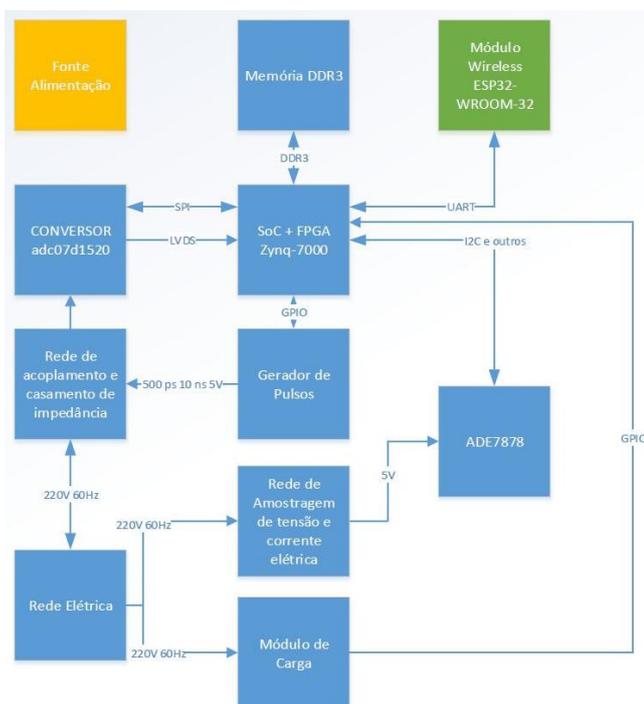


Fig. 1 Arquitetura Macro do Hardware (autoria própria)

2.2.1 Detalhamento dos Módulos

O circuito gerador de sinais é baseado no efeito Avalanche que ocorre em semicondutores, quando a tensão de *breakdown* é excedida. Esse circuito se aproveita da característica de instabilidade desse efeito para gerar pulsos extremamente rápidos, com tempos de subida da ordem de 500 ps. O sinal desse circuito é então acoplado a um *driver* diferencial para adequar à entrada do ADC e também à saída do equipamento através de um capacitor de 1 nF - 1 kV.

O módulo de aquisição AD tem capacidade para 1 GSps em um canal. O sinal de chegada deve ser adequadamente condicionado para a faixa de operação do mesmo.

Para a parte de medição, uma rede de amostragem de tensão e corrente é construída para condicionar os sinais de modo que possam ser processados por um conversor AD. Esse processo é realizado pelo circuito integrado (CI) ADE7878, da Analog

Devices. Esse CI foi escolhido por já incluir todas as funções necessárias para medidas elétricas e cálculos de energia.

O módulo de carga aplica, paralelamente à unidade consumidora, uma carga conhecida, como forma de alterar o consumo instantaneamente e comparar as medições entre o medidor da UC e o equipamento afim de detectar desvios.

O módulo de comunicação é composto por um módulo Wireless ESP32-WROOM-32 que possui interfaces Wi-fi e Bluetooth BLE.

2.3 Aplicação

A aplicação provê, de forma geral, funcionalidades de cadastro e edição de informações, comando e visualização de resultados da solução. A aplicação será a principal responsável por permitir ao usuário que realize o conjunto de ensaios providos pelos diferentes módulos de hardware e software. Além disso, também será por meio da aplicação que os módulos poderão receber e exibir informações de cadastro de medidores e unidades consumidoras, auxiliando as equipes de inspeção durante seus processos em campo.

3. RESULTADOS

A operação geral do circuito do *hardware* foi simulada em um modelo simplificado. Entretanto não estão disponíveis os modelos reais para o processador e o conversor AD. Assumiu-se, assim, o comportamento desses componentes conforme especificações genéricas apenas baseado na frequência de operação do circuito. A simulação teve, portanto, foco no circuito isolado de geração de pulso e da captação de suas reflexões pelo condicionador de sinal adequando a níveis compatíveis com o conversor AD selecionado. O circuito da rede de distribuição foi modelado como uma linha de transmissão com velocidade de propagação aproximada de 0,43 vezes a velocidade da luz no vácuo, sendo os parâmetros dessas linhas e os comprimentos de cada seção gerados aleatoriamente com médias e desvios padrão determinados. A indutância por unidade de comprimento e a capacitância por unidade de comprimento foram 470 nH e 100pF com desvio padrão de 1%, resistência por unidade de comprimento 0,4 Ohms com desvio padrão de 1%. O comprimento da aplicação do pulso até o ramal de distribuição da unidade consumidora foi definido como 3 m, com desvio padrão de 20%, e o comprimento desse ponto até o transformador de distribuição foi definido como 15 m, com desvio padrão de 50%, assim como o comprimento da derivação.

Os resultados de simulações de Monte-Carlo para cada caso são apresentados nas Figuras 2 e 3. Nota-se de forma distintiva a existência de derivação no segundo caso como uma reflexão negativa do pulso na marca de aproximadamente 45 ns após a aplicação do pulso, o que é compatível com a impedância característica da linha e os 6 m de distância média da viagem de ida e volta da onda de tensão.

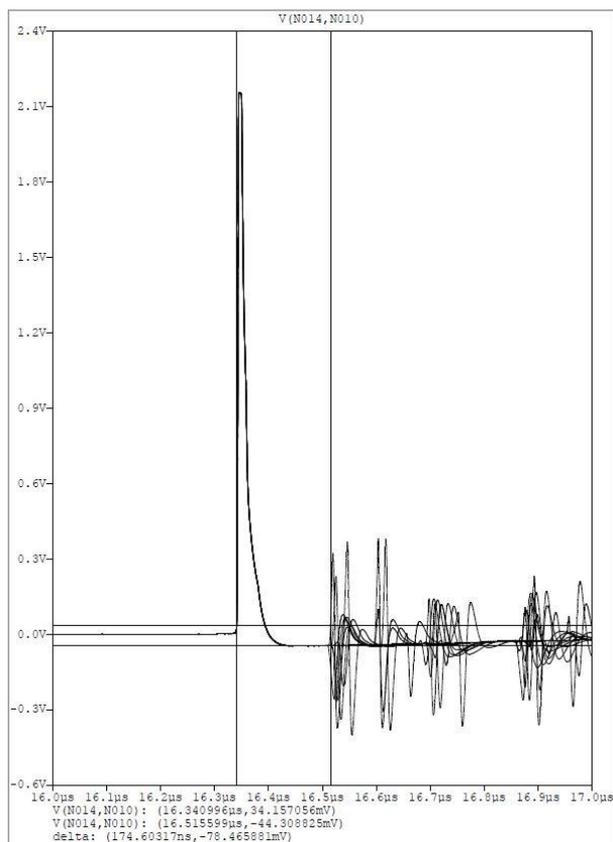


Figura 2 - Onda de tensão após o condicionamento de sinal – circuito sem derivação

Foi também simulada a interação do circuito isolado com a rede elétrica em funcionamento, como forma de validação da isolamento requerida. O resultado para o caso sem derivação é apresentado na Figura 4, para um tempo total de aproximadamente dois ciclos da rede. Nota-se que a tensão de 220 V RMS da rede elétrica fica isolada do circuito de medição, permitindo sua operação em níveis de baixa tensão com segurança.

Na aplicação a ser utilizada pelas equipes durante a inspeção, foram desenvolvidas as interfaces de diversas funcionalidades, como as de inicialização e resultados do teste de derivação para detecção de desvios, como mostrada na Figura 5. Nessas interfaces o usuário informa algumas características referentes à UC analisada, indica se o equipamento está conectado ao circuito de entrada e dispara o teste de verificação de derivação no equipamento. De forma semelhante, mas por meio de outra interface, o usuário realiza o teste de identificação de irregularidades nos medidores eletrônicos, para identificar alterações em seus circuitos, e o teste de carga na UC, que compara a energia medida pelo medidor com a do equipamento em um curto intervalo de tempo.

Além disso, outras interfaces relacionadas ao equipamento foram desenvolvidas na aplicação, como a de sincronização da aplicação com o equipamento.

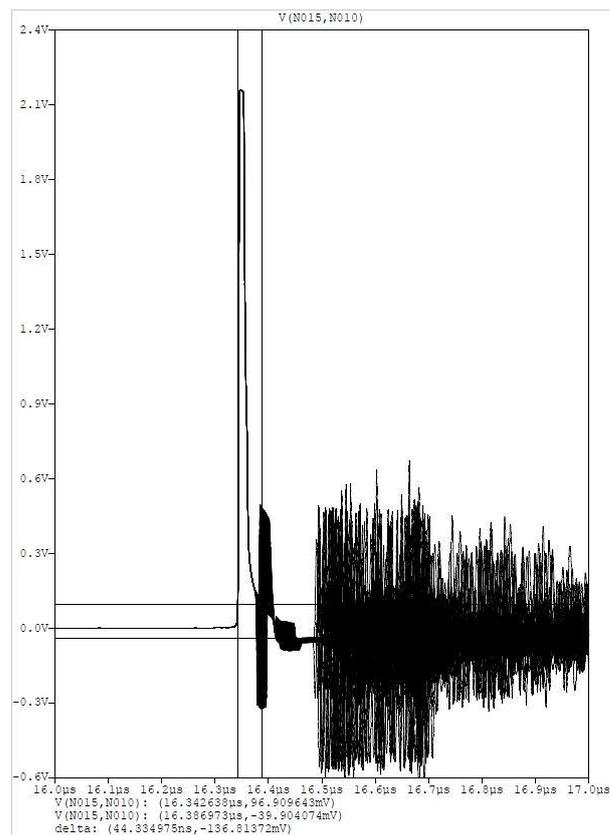


Figura 3 - Onda de tensão após o condicionamento de sinal – circuito com derivação

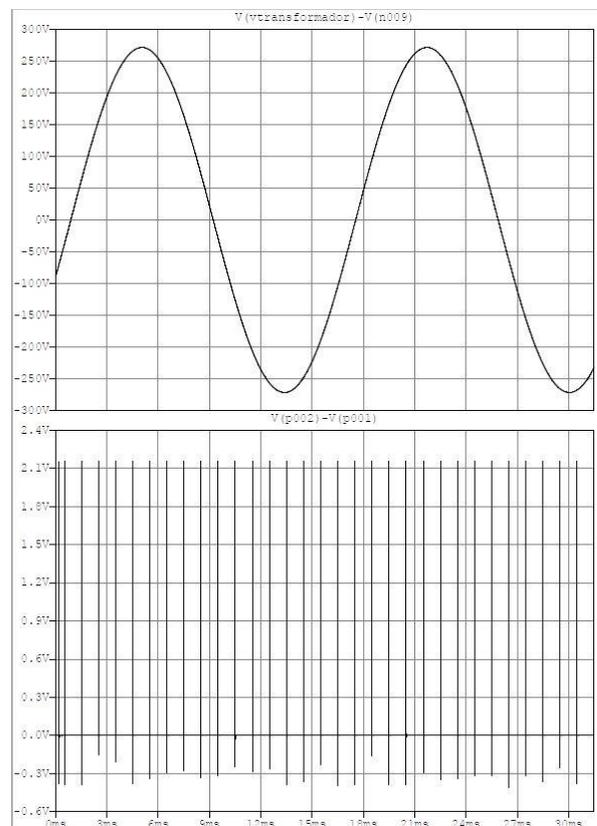


Figura 4 - Onda de tensão da rede e onda de tensão após o condicionamento de sinal – circuito sem derivação

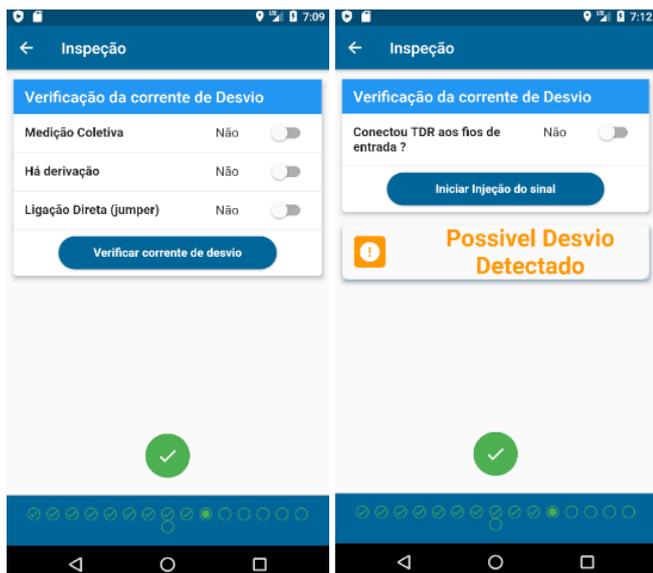


Figura 5 – Interfaces da funcionalidade da aplicação referente ao teste de verificação de desvio por meio da técnica TDR

4. CONCLUSÃO

Tanto no âmbito nacional quanto internacional, as perdas comerciais ainda representam um grande obstáculo para o sistema elétrico de potência. Ainda é bastante dispendioso para as concessionárias, tanto em termos financeiros quanto de recursos humanos e técnicos, fiscalizar e inspecionar esses focos de perdas, aumentando ainda mais o impacto dessas perdas no planejamento e execução dos projetos relacionados ao SEP em questão.

A solução proposta pelo projeto e descrita nesse trabalho utiliza a técnica TDR para melhorar a eficiência do processo de inspeção em campo, garantindo melhores resultados em relação ao índice de acerto das inspeções e, conseqüentemente, maior retorno financeiro para a concessionária.

Os resultados obtidos para o teste da técnica TDR para identificação de desvio mostraram-se eficientes, com precisão na indicação da distância da derivação na rede simulada. Espera-se que nas etapas posteriores que venham a completar o projeto, testes em ambientes de laboratório e reais que ratifiquem os resultados iniciais obtidos. Além disso, a aplicação de *smartphone* desenvolvida garantirá maior facilidade e agilidade aos eletricitistas na realização dos testes em campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CPFL Energia através do programa P&D ANEEL, processo PD-00063-3064/2019.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. (2017). P&D ANEEL - Identificação de falhas e derivações em cabos subterrâneos de Rede de Distribuição de Baixa Tensão. *Revista de P&D*(7).
- ANEEL. (2019). *Perdas de Energia Elétrica na Distribuição*. Brasília.

Bazelatto, G. D., Pereira, P. S., Lourenço, G. E., Choqueta, M. A., Andrade, J. F., Martins, C. M., . . . Jr., P. S. (2005). Sistema de Localização de Fraudes e Desvios de Energia em Redes de Baixa Tensão de Distribuição de Energia Elétrica – Patente BR 10 2013 024833 9 A2. *6o SEMETRO - Seminário Nacional de Metrologia Elétrica*.

Eldorado. (16 de 9 de 2015). *Aferidor CPFL*. (Eldorado) Acesso em 27 de 12 de 2019, disponível em <https://www.eldorado.org.br/noticias/aferidor-cpfl/>

Ferreira, T. S. (2015). Método para Detecção e Localização de Perdas Não Técnicas em Sistemas de Distribuição Explorando Medidores Inteligentes. *Dissertação - Mestrado - UNICAMP*. Campinas.

G.H. Shirkoohi, K. H. (2010). Enhanced TDR Technique for Fault Detection in Electrical Wires and Cables. *2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010*.

Neoenergia. (2015). Fiscalização com Menor Custo e Menor Risco. *Eficiência Energética e P&D Neoenergia*(4), 40-41.

Penin, C. A. (2008). Combate, Prevenção e Otimização das Perdas Comerciais de Energia. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Poubarab, M. H., Alishahi, S., & Aghli, N. (15 - 18 de June de 2015). Electric Power Detection Using Time Domain Reflectometer. *International Conference on Electricity Distribution*.