



GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

EXPERIÊNCIAS DA TAESA NA APLICAÇÃO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS POR ONDAS VIAJANTES

**ARTHUR AUGUSTO PEREIRA CRUZ(1);CARLOS EDUARDO FERREIRA PIMENTEL(2)
TRANSMISSORA ALIANÇA DE ENERGIA ELETRICA S/A(1);GE GRID SOLUTIONS(2)**

RESUMO

A necessidade de detecção de faltas em linhas de transmissão da maneira mais rápida e precisa possível têm crescido significativamente no setor elétrico, principalmente nas últimas décadas, após a desregulamentação do setor. Neste cenário, o uso de métodos de localização de faltas que tenham uma eficácia melhor que os tradicionalmente empregados são de extrema importância para a operação segura e econômica das linhas de transmissão.

O presente trabalho mostra, de maneira resumida, o desempenho do sistema de localização de faltas em operação em uma companhia de transmissão de energia do setor elétrico brasileiro para diversos casos de faltas, bem como mostra sua viabilidade de implantação em função do custo de aquisição.

PALAVRAS-CHAVE

TWFL, RDP, oscilografia, Localização de faltas por ondas viajantes

1.0 INTRODUÇÃO

A necessidade de localização de faltas em linhas de transmissão de maneira rápida e precisa tem crescido de maneira significativa no setor elétrico, sendo no Brasil principalmente explicado pelo fato de que as transmissoras são remuneradas pela disponibilidade das linhas que opera [1], com pagamento de multas que variam de acordo com a importância da linha ao sistema elétrico. Neste ambiente, o uso de técnicas convencionais para localização de faltas, além das limitações já conhecidas de precisão, são negativamente impactadas adicionalmente com a crescente penetração de geração renovável [2], levando a transmissoras que operam o sistema a buscar soluções alternativas e que tenham capacidades que atendam às necessidades de operação do sistema. Neste cenário, a metodologia de localização de faltas em linhas de transmissão pode ser efetuada por várias metodologias, e dentre estas se destaca a localização de faltas por ondas viajantes.

O uso de métodos de localização de faltas que tenham uma eficácia melhor que os tradicionalmente empregados têm tido interesse para aplicações em campo, uma vez que a determinação rápida e precisa do local da falta proporciona agilidade no envio de pessoal à campo para verificação da falha, além de permitir religamentos mais rápidos em locais onde o risco de acidentes devido a religamento é considerado baixo. Como, de maneira geral, gasta-se boa parte do tempo na determinação exata do local de falta, um método que tenha precisão perante os diversos tipos de linhas de transmissão, níveis de tensão e tipos de faltas que ocorram nas linhas de transmissão oferece ambos os benefícios requeridos pelas companhias, de melhorar seus índices de disponibilidade das linhas de transmissão e na de redução da parcela variável.

Aliado à necessidade de novas técnicas de localização existe a justificativa de um investimento em uma tecnologia que não é obrigatória dentre dos contratos de prestação de serviços de transmissão e na legislação do setor. Quando uma empresa de transmissão opta por este investimento, ela estará despendendo um CAPEX inicial em prol da eficiência e segurança operacional desejada por ela. Para justificar este custo, onde se percebe um momento atual de leilões de transmissão mais agressivos, com deságio médio de 48% [3], se faz necessário que as equipes técnicas das transmissoras realizem um estudo técnico-financeiro que suporte esta escolha.

Neste contexto, um estudo foi realizado, através de uma pesquisa quantitativa exploratória do tipo estudo de caso, onde buscou-se analisar estatisticamente o desempenho dos sistemas de localização de faltas em linhas de transmissão de forma a comparar a precisão do sistema de localização de faltas por ondas viajantes com os algoritmos de localização de faltas tradicionais disponíveis nos relés e analisar o retorno financeiro da aquisição do sistema de localização de faltas por ondas viajantes

Este artigo mostra o sistema de localização de faltas em operação na companhia, o qual é uma funcionalidade disponível nos registradores de faltas em operação nas linhas, que realiza a medição de ondas viajantes nas tensões das linhas e utiliza os registros de oscilografia combinados com o de ondas viajantes para realizar a localização de faltas. Ademais, são detalhados diversos casos de faltas nas linhas da companhia onde o método de ondas viajantes foi utilizado: faltas onde a causa foram queimadas, descargas atmosféricas, contato de cabos condutores com vegetação, em linhas com compensação de capacitor série, reatores de linhas e subestações com reatores em barras, entre outros casos são mostrados e analisados.

2.0 MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA

Existem atualmente diversas técnicas de localização de faltas em sistemas de energia, e em geral os métodos são classificados em duas grandes categorias, que são técnicas baseadas em medições fasoriais e técnicas não convencionais (baseadas em transitórios e inteligência artificial) [4]. Adicionalmente, principais métodos utilizados são mostrados no guia do IEEE para localização de faltas [6]. Os próximos tópicos exploram de uma forma sucinta os três métodos comumente utilizados no setor.

2.1 Takagi (um terminal)

O método conhecido como Takagi foi proposto em [5], e é amplamente reconhecido e utilizado. O método proposto é um método de um terminal (ou de uma ponta), e é baseado nas medições de valores eficazes de tensão e corrente no terminal da linha de onde se pretende calcular a distância da falta.

O método Takagi é um método bastante utilizado principalmente por sua relativa simples implementação, uma vez que usa medições comuns a relés ou registradores de falhas, ou seja, pode vir embarcado no mesmo hardware destes equipamentos. O cálculo neste método se baseia em algumas premissas, como por exemplo de que o ângulo da corrente de falta em ambos os terminais da linha é igual e de que a constante de propagação da linha é suficientemente baixa para que sua tangente seja aproximadamente seu valor, além de se utilizar dos valores de tensão e corrente pré e durante a falta, para realizar o cálculo da distância.

Das três metodologias citadas neste trabalho, esta é a menos precisa, uma vez que existem diversos fatores que interferem na localização como corrente de carga, corrente de sequência zero, entre outros. Por outro lado, uma de suas vantagens é que, com os dados de correntes e tensão de apenas um dos terminais, é possível determinar uma localidade de falta.

2.2 Sequência Negativa

O método conhecido por Sequência Negativa é apresentado em [7] consiste em um método tradicional de localização de faltas classificado como de dois terminais (ou duas pontas), e neste caso medições de correntes e tensões de ambos os terminais da linha de transmissão são necessários para o cálculo da distância até a falta.

Este método essencialmente utiliza informações de sequência negativa e impedância de sequência positiva da linha para o cálculo da distância, e se mostra mais estável se comparado com o método de uma ponta, principalmente por usar mais informações da linha, apesar de não necessariamente apresentar uma precisão muito maior que métodos de um terminal [8]. Apesar de não utilizar em seu modelo a impedância de falta, o método em questão pode apresentar erros maiores em casos em que a impedância de falta não é constante, notadamente em casos em que a falta não atinge o valor de regime e onde não há sincronismo dos registros de oscilografia entre os terminais [6].

Por fim, é digno de nota que uma das principais razões para os erros em métodos de impedância são provenientes do sistema de medição em si (TP, TPC e TC) além dos erros dos parâmetros da linha. Para métodos de um ou dois terminais, a precisão típico encontrada na localização da falta é relativa ao comprimento da linha, em geral de $\pm 1\%$ a $\pm 5\%$, este último na maioria dos casos [8].

2.3 Ondas Viajantes

O fenômeno de ondas viajantes (TW – Traveling Waves) em linhas de transmissão ocorre por diversos fatores, onde os mais comuns são faltas, chaveamentos no sistema e descargas atmosféricas, e a velocidade de propagação das ondas de corrente e tensão em linhas de transmissão aéreas é próxima à da velocidade da luz [6]. A utilização de ondas viajantes, principalmente para localização de faltas, se tornou mais conhecida na década de 1940, após Bewley propor o método gráfico de determinação dos instantes de tempo e de reflexão das ondas, atualmente chamado de diagrama de Bewley-Lattice [9], exemplificado na Figura 1.

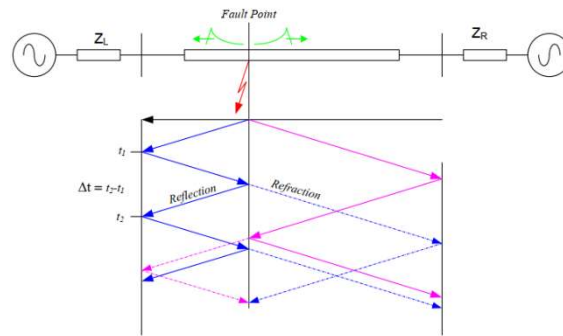


Figura 1: Diagrama de Bewley-Lattice [6]

Atualmente a classificação dos métodos de localização baseados em ondas viajantes popularmente conhecida foi definida em 1951 por Lewis, onde os métodos são classificados como métodos A, B, C e D, sendo os métodos basicamente divididos entre métodos de um ou dois terminais e métodos com ou sem onda portadora. Além destes métodos, é também utilizada a nomenclatura de método E para métodos que utilizam os sinais de ondas viajantes quando uma linha é re-energizada, essencialmente usado para casos de faltas permanentes [6].

Apesar de se entender, desde as primeiras publicações, que a localização de faltas utilizando ondas viajantes potencialmente teria precisão maior que os métodos de impedância por não ser dependente de parâmetros elétricos, como impedância da linha, carga ou compensação de reativos, a utilização na prática de localização por faltas por ondas viajantes se deu principalmente após a disponibilização dos sinais de sincronismo de tempo por GPS. Localizadores de vários métodos foram apresentados em [10], e equipamentos para este fim começaram a ser disponibilizados comercialmente somente na década de 1990. Mais recentemente, o estudo apresentado em [8] compara diferentes métodos de localizações de faltas baseada em métodos de impedância com métodos por ondas viajantes, e é mostrado que erros para uma linha de quase 200 km são da ordem de quilômetros para métodos convencionais e de centenas de metros para ondas viajantes.

Do ponto de vista prático, o método consiste na medição da onda viajante, caracterizada por uma frente de onda originada pelos transitórios da falta, em locais conhecidos da linha de transmissão, geralmente nas subestações que conectam as extremidades da linha monitorada, uma vez que os localizadores podem se conectar aos equipamentos de medição utilizados pelos sistemas de proteção e controle, como os TP, TPC ou TC. Ademais, diferente de métodos tradicionais de impedância, o uso de ondas viajantes não é significativamente afetado por parâmetros de linha, tipos de falta ou compensações de reativos, fazendo dele uma alternativa interessante para aplicação.

Uma vez detectado o início da onda (e sua reflexão, a depender do método utilizado) em ambos os terminais da linha, o equipamento compara o tempo de chegada e consegue assim localizar a falta. O método mais utilizado atualmente é o método tipo D, onde são utilizados equipamentos com medição sincronizada em ambos os terminais. Neste método, além da detecção da estampa de tempo da frente de onda em ambos os terminais, as únicas informações adicionais para localização de faltas são o comprimento da linha e a velocidade da onda, em geral referida como Fator k , sendo " k " o fator a ser multiplicado pela velocidade da luz para determinação da velocidade da onda viajante.

3.0 ESTUDO DE CASO – NOVATRANS

Para avaliar a performance do sistema de localização de faltas que utiliza da tecnologia de ondas viajantes, foi escolhido uma das concessões da TAESA de forma a avaliar se a tecnologia implementada está com o desempenho esperado de acordo com os referências teóricos. Os dados coletados foram referentes à concessão NOVATRANS tronco de interligação norte-sul do sistema elétrico de potência brasileiro.

Os resultados foram analisados através da leitura de relatórios de inspeção de linhas de transmissão que são gerados após um desligamento e pela análise das oscilografias. Os dados extraídos dos relés de proteção são oriundos da metodologia de localização de um terminal utilizando o software de análise de oscilografias Siga. Já os dados de localização obtidos através do localizador de faltas por ondas viajantes é obtido através da obtenção das oscilografias de alta frequência dos dois terminais utilizando o registrador da família RPV311 e software TW Fault Locator da GE Reason.

A operacionalização da pesquisa, contou inicialmente com a etapa de coleta de dados, entre o período de 2014 a 2017, onde foram comparados os locais que os equipamentos de localização de faltas indicaram onde ocorreu a perturbação com os locais encontrados pela a equipe de manutenção. A quantidade de amostras avaliadas, descritas

na Tabela 1, contabilizam apenas desligamentos de funções de Transmissão Linha de causa interna, isto é, desligamentos acidentais, de origens secundárias, não são contabilizados.

O localizador de faltas por ondas viajantes foi implementado na concessão no final do ano de 2015 e fez com que os registros de localização de falta pelos relés de proteção não fossem mais necessários e, portanto, a maior parte das ocorrências após essa data não tiveram esse dado registrado, sendo necessário utilizar-se dos registros das ocorrências anteriores a fim de comparação. Sendo assim os dados de localização de faltas pelos relés de proteção foram do período de 2014 a 2017 enquanto o de localização de faltas por ondas viajantes foram do período do fim de 2015 a 2017.

Tabela 1 - Quantidade de oscilografias analisadas em função de desligamentos por ano

Ano	Quantidade
2014	26
2015	36
2016	17
2017	17
Total	96

As linhas de transmissão avaliadas possuem comprimento médio de 250 km e todas possuem compensação série de reativo.

Tabela 2 - Dados das LTs da Novatrans

Comprimento das LT		
LT	Comprimento (km)	Compensação Série
LT CO-MC	174,0	Sim
LT SM-SB3	248,6	Sim
LT GU-MC	254,9	Sim
LT SM-GU	257,3	Sim
LT IZ-CO	343,5	Sim

4.0 RESULTADOS

A coleta dos dados resultou nos dois gráficos abaixo para cada um dos sistemas de localização de faltas. A análise da eficiência e a comparação entre os sistemas é mostrada na Figura 2. Para esta análise foi utilizada uma média interna de 50% para expurgar dados extremos e fora do padrão.

A partir dessa análise estatística foi possível fazer o cálculo do retorno financeiro, e para isso foi necessário fazer as seguintes considerações:

1. Os custos das ações feitas durante uma inspeção rápida de linhas de transmissão anual são equivalentes a inspeção após uma perturbação. A inspeção rápida é realizada para a verificação do estado geral de todos os componentes da linha de transmissão, sem a obrigatoriedade de escalada da estrutura que está descrita na política de manutenção da empresa;
2. A equipe irá investigar em média o dobro do erro do equipamento pois ela irá percorrer antes e após o ponto informado;
3. No caso de falha da localização por ondas viajantes, será utilizado o dado extraído do relé de proteção. Nos 3 anos de funcionamento do localizador por ondas viajantes o equipamento não informou uma posição válida em 9% das perturbações. É considerado que essa taxa se manterá durante a vida útil do equipamento;
4. Utilizou-se que a quantidade média de perturbações na linha por ano durante os 4 anos analisados como sendo a quantidade média de ocorrências para toda a vida útil dos RDPs conforme manual de controle patrimonial da ANEEL (MCPSE), que são de quinze anos.

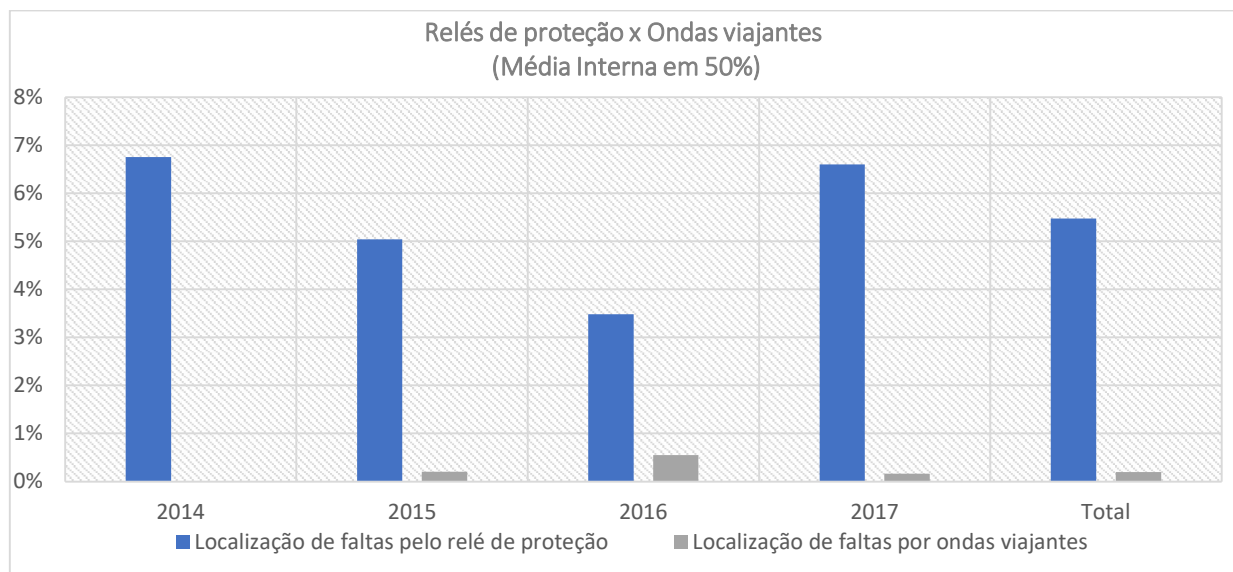


Figura 2 - Comparação do erro da localização de faltas ao longo de 4 anos

Após plotar os dados conforme Figura 2, podemos notar que a precisão do método de localização de faltas por ondas viajantes é muito superior à metodologia que utiliza o método de um terminal. Também é notado que existem casos em que o erro ao usar apenas o método de um terminal supera os 20% do comprimento da linha, e podem ser explicados como sendo causados pelo tipo da falta e resistência de falta, pois esta metodologia é prejudicada por estes fatores, o que já não ocorre com as ondas viajantes.

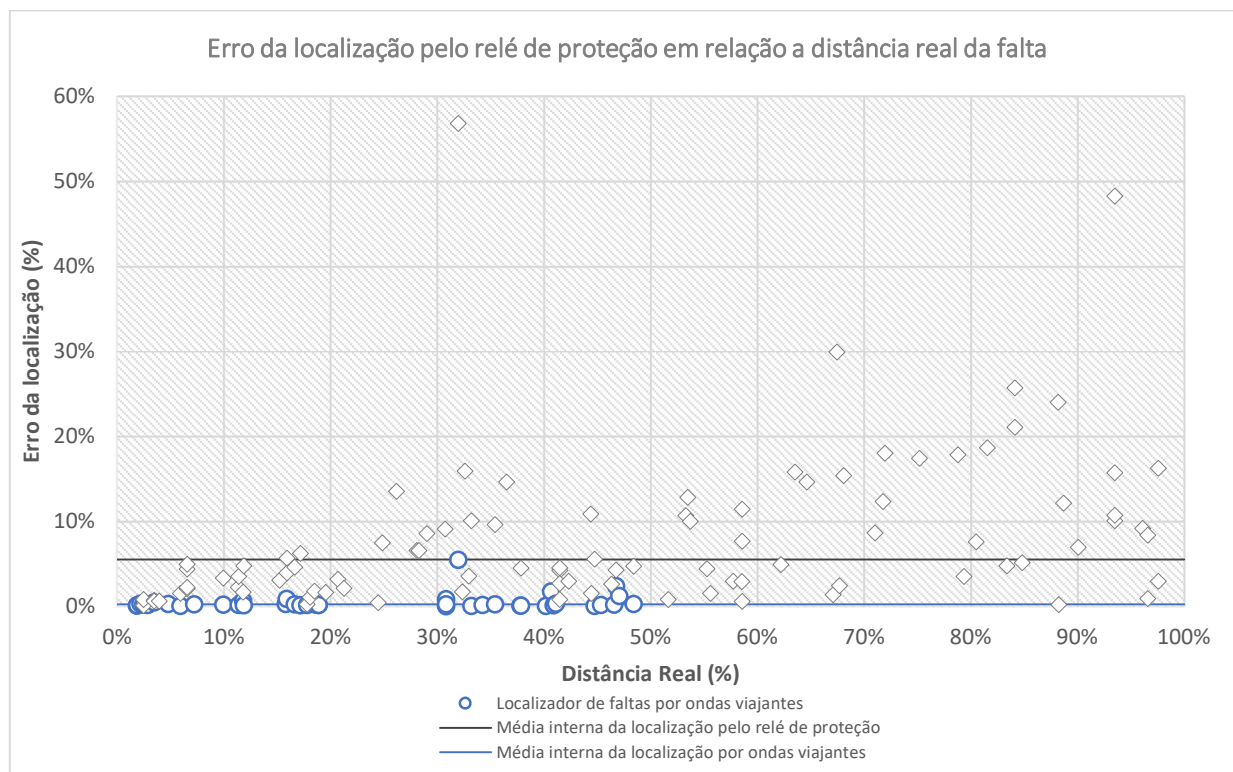


Figura 2- Erro da localização em função da tecnologia versus distância real da falta

Com base nas informações coletadas, a média interna dos erros de localização disponibilizados pelos relés ficaram na casa de 5,5%, enquanto o sistema de localização por TW em 0,19%.

Após a obtenção dos erros de cada sistema, foi possível realizar uma estimativa de redução com as inspeções. Para o cálculo de retorno do investimento foi considerado o investimento médio em um RDP sem localização por TW

versus Investimento em RDP com localização por TW, realizado uma média de desligamentos de cada LT por ano e em seguida é multiplicado pela economia do trajeto a ser percorrido em ambas as tecnologias. O valor gasto para inspeção de cada Linha não é divulgado neste artigo por se tratar de um dado de sigilo empresarial, porém, considerando a inflação média dos últimos 20 anos, o tempo de retorno dos investimentos calculado é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Payback calculado em função do investimento inicial

Tempo de Equivalência de Investimento	
Concessão	3,3 anos
LT CO-MC	3,3 anos
LT SM-SB3	2,5 anos
LT GU-MC	5,8 anos
LT SM-GU	3,5 anos
LT IZ-CO	2,8 anos

A análise financeira realizada neste trabalho incluiu apenas interrupções imprevistas que não geraram PV (Parcela Variável). Assim, o custo financeiro é baseado apenas no custo de homem-hora da equipe para encontrar a referida perturbação. Porém para as interrupções não consideradas é possível verificar que com o localizador de faltas por ondas viajantes terá um aumento na economia já que essas são ainda mais sensíveis ao tempo de trabalho da equipe

5.0 CONCLUSÃO

O mercado de energia tem alterado seus requisitos de performance nos últimos anos, com mudanças principalmente relacionadas com a desregulamentação do mercado e nos novos requisitos necessários para atendimento do mesmo. Neste cenário, as transmissoras, assim como a TAESA, têm buscado alternativas para melhoria de seus índices nessa nova realidade, e neste processo a inclusão de localizadores de faltas por ondas viajantes têm se mostrado como uma alternativa viável para diminuir os tempos de indisponibilidade de linhas, consequentemente diminuindo os custos envolvidos no mesmo e aumentando seus índices de disponibilidade.

A experiência da TAESA, conforme demonstrado neste trabalho, mostra que o método de localização de faltas por ondas viajantes empregado possui uma performance condizente com o esperado de acordo com a literatura, inclusive em cenários onde o método de impedância tradicionalmente possui problemas de acurácia, como linhas com compensação de reativos, as quais fazem parte da realidade das linhas operadas pela TAESA. O estudo mostrado neste artigo mostrou que, para linhas com comprimentos médios superiores que 250 km, a acurácia alcançada é melhor que 0.5%, o que na prática é a distância média entre torres em linhas de transmissão nos níveis de tensão operado pela companhia.

Por fim, o estudo de retorno financeiro contido neste trabalho mostra que o tempo de retorno do investimento dos localizadores de faltas por ondas viajantes utilizado pela TAESA é muito menor que o tempo de vida útil esperado dos ativos, de maneira que a sua implantação nas linhas, mesmo nos casos de interrupção que não geraram PV, é justificada não só pelos benefícios técnicos mostrados, mas também pelo tempo de retorno do investimento no sistema utilizado.

6.0 Referências

- [1] L. B. de Oliveira, C. Dutra, R. Matos, P. de Souza e S. Zimath. "Predictive Maintenance with Travelling Wave Fault Location", in "CIGRÉ - Study Committee B5 Colloquium", nº PS3-316, pp. 20-26, 2015.
- [2] S. H. H. Kazmi, J. Wang e Y. Li. "Comparison of High-Speed Transient-based Pilot Directional Protection Algorithms for Distribution Grids", in "IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)", pp. 1-5, 2018.
- [3] Leilão de Transmissão da ANEEL, realizado na B3, obtém deságio médio de 48,12% (on-line). São Paulo, 30/06/21. Disponível na Internet:
URL: http://www.b3.com.br/pt_br/noticias/leolao-da-aneel-na-b3-obtem-desagio-medio-de-48-12.htm
- [4] T.D.Le, M. Petit. "Earth Fault Location Based on a Modified Takagi Method for MV Distribution Networks", in "UPSud and UPMC Gif-sur-Yvette", France, 2016.
- [5] Takagi.T , Yamaura.M. Development of a New Type Fault Locator Using The One-Terminal Voltage and Current Data, in "IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems", Vol. PAS-101, No. 8 August 1982.
- [6] IEEE Std. C37.114-2004, Guide for Determining Fault Location on Transmission and Distribution Lines.
- [7] Johns A., Jamali S. "Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines", in "IEEE Proceeding – Generation, Transmission and Distribution", 173, part C(6): 395-402.
- [8] Zimath S. L., Dutra C. A., Seibel C., Ramos M. A. F., Filho J. E. "Comparação de algoritmo de localização de uma e duas pontas por impedância com o método de ondas viajantes em registros reais", in XX SNPTEE, Novembro, 2009.
- [9] L. V. Bewley. "Traveling Waves on Power Electric Sytem", New York: Wiley, 1941.
- [10] P. Gale, Crossley, P.A., X. Bingyin, G. Yaozhong, B. J. Cpry e J. R. G. Barker, "Fault location based on travelling waves," in "Fifth International Conference on Developments in Power System Protection", pp. 54-59, 1993.

DADOS BIOGRÁFICOS**(1) ARTHUR AUGUSTO PEREIRA CRUZ**

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFJF e pós graduado em Automação de Subestações e Gestão de Projetos. Possui mais de dez anos de experiência, tendo iniciado a sua carreira como técnico em mecânica de manutenção. Trabalhou com o comissionamento de usinas e subestações e atualmente é Engenheiro de Transmissão Sênior na Gerência Executiva de Engenharia de Transmissão da TAESA onde trabalha com comissionamento de novos projetos, análise de ocorrências e estudos de engenharia em geral.

(2) CARLOS EDUARDO FERREIRA PIMENTEL

Nascido em Guarapuava, PR, possui graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e atualmente cursa pós-graduação MBA na Universidade de São Paulo campus ESALQ (USP/ESALQ). Exerceu atividades de projeto, engenharia, comissionamento e suporte técnico dos produtos da linha Reason entre 2013 e 2019, tendo atuado principalmente com as soluções de TWFL, PMU, redes Ethernet e Subestações Digitais. Atualmente é Engenheiro de Aplicação de Serviços na GE Grid Automation, atuando com serviços na linha GE Reason, linhas industriais (Load Shedding / Motor Health), e proteção sistêmica (SIPS/WAMPACS).