

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

**APLICAÇÕES BASEADAS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES: APRENDIZADOS, AVANÇOS
RECENTES E TENDÊNCIAS**

**FELIPE VIGOLVINO LOPES (1); RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS (2);
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB) (1)
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO (UFRPE) (2)**

RESUMO

Neste artigo, apresentam-se resultados de uma pesquisa nacional sobre a situação de conhecimento e de aplicação de tecnologias baseadas na teoria de ondas viajantes (TW) no setor elétrico brasileiro. Dos resultados, mapeia-se um cenário confiável a respeito do conhecimento de concessionárias e pesquisadores sobre o tema, identificando-se ainda interesses, experiências, dificuldades e perspectivas futuras. Na sequência, apresenta-se uma revisão da literatura recente sobre aplicações TW, mapeando-se a forma como a evolução das tecnologias TW tem ocorrido em âmbito mundial. Por fim, os resultados da pesquisa nacional são correlacionados com os obtidos de uma revisão da literatura, destacando-se aprendizados sobre aplicações práticas, bem como indicando avanços recentes e tendências futuras que poderão aprimorar as aplicações TW atualmente empregadas no Brasil e em outros países.

PALAVRAS-CHAVE

Aplicações TW, diagnóstico de perturbações, ondas viajantes, sistemas elétricos de potência, TW.

1.0 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia digital, além das funcionalidades clássicas baseadas na análise de fasores fundamentais, tornou-se possível a análise de componentes transitórias induzidas por faltas para fins diversos [1]. De fato, registradores digitais de perturbações (RDP) passaram a operar com taxas de amostragem da ordem de mega-hertz, culminando na popularização de aplicações reais baseadas na teoria de ondas viajantes, as quais são aqui chamadas de funções TW, sigla esta proveniente do termo em inglês *Traveling Waves*. Com isso, tornou-se possível visualizar fenômenos até então não enxergados no mundo real [2], o que tem promovido aprendizados e avanços na rota tecnológica associada às aplicações TW. Diante do exposto, além da referida popularização, a aplicação da teoria TW para desenvolvimento das mais diversas soluções tem ganhado destaque nos esquemas de monitoração de sistemas elétricos de potência, em especial, nas linhas de transmissão (LTs).

O contexto supracitado tem motivado pesquisas em vários países no sentido de aprimorar processos existentes e de propor novas tecnologias TW. Por exemplo, até poucos anos atrás apenas localizadores de faltas baseados na teoria TW eram encontrados no comércio, mas atualmente, dispositivos reais já incorporam funções voltadas para proteção de sistemas elétricos [3]. Adicionalmente, apesar da maioria das funções TW ter como objetivo final processos de localização de faltas em LTs ou proteção ultrarrápida de linhas, soluções voltadas para a classificação de faltas, detecção e diagnóstico de perturbações, ou até mesmo para sincronização de oscilografias também têm sido reportadas na literatura [2]-[4], fato este que comprova a expansão das aplicações TW em sistemas elétricos reais. No entanto, apesar da nítida expansão das funcionalidades TW e do crescente interesse da indústria por essas soluções, informações sobre aprendizados e experiências vivenciadas no tema ao longo dos últimos anos continuam fragmentadas na literatura nacional e internacional. Tal fato dificulta uma ampla divulgação das tecnologias TW no setor elétrico, impondo dificuldades no uso consciente dos métodos e na identificação de aprimoramentos.

Neste trabalho, apresentam-se inicialmente os resultados de uma pesquisa nacional realizada no âmbito do grupo espelho B5.55 Brasil do CIGRE (cujo tema foco consiste em "Aplicações de proteção e automação baseadas na teoria TW para sistemas elétricos de potência") quanto à situação de conhecimento e aplicação de tecnologias TW no país. Então, com base nas respostas coletadas, delinea-se em um cenário confiável quanto ao conhecimento do setor elétrico sobre as soluções TW, incluindo a identificação de interesses e visão de concessionárias e pesquisadores envolvidos com o tema. Em seguida, com base nas conclusões preliminares obtidas, apresenta-se uma revisão da literatura sobre desenvolvimentos realizados em anos recentes, destacando-se percepções dos autores quanto a tendências que não são abordadas explicitamente na literatura, especialmente no que diz respeito aos avanços de métodos TW, aplicações TW em LTs híbridas e expansão das funcionalidades TW. Adicionalmente, da pesquisa, identificam-se ainda as tecnologias TW mais empregadas no Brasil, dispositivos microprocessados reais disponíveis no comércio que possuem funcionalidades TW, aplicações TW de maior interesse para o setor elétrico, tendências nas metodologias e tecnologias para testes de funções TW, entre outros.

2.0 PESQUISA SOBRE SITUAÇÃO DE CONHECIMENTO E APLICAÇÕES TW NO BRASIL

Em fevereiro de 2020, sob coordenação dos autores deste artigo, foram iniciadas efetivamente as atividades do grupo espelho B5.55-Brasil do CIGRE, cujo tema de estudo consiste em “Aplicações de proteção e automação baseadas na teoria de ondas viajantes para sistemas elétricos de potência”. A primeira atividade do grupo consistiu em realizar uma pesquisa junto a empresas e pesquisadores do setor elétrico para mapeamento da situação de conhecimento e uso de aplicações TW no Brasil. Tal pesquisa foi iniciada em 23/07/2020 e encerrada em 11/09/2020, contando com 410 respondentes de mais de 300 instituições diferentes, dentre concessionárias e universidades.

É importante ressaltar o ineditismo desse tipo de pesquisa, o que torna os resultados obtidos bastante representativos quanto ao contexto do Brasil no uso de funções TW. Todas as perguntas foram elaboradas, revisadas e aprovadas no âmbito do grupo espelho B5.55 Brasil, que é atualmente composto por profissionais de mais de 20 instituições. Para facilitar o entendimento dos resultados, os mesmos serão apresentados em diferentes seções.

2.1 Resultados quanto ao nível de conhecimento e opinião dos(as) respondentes sobre aplicações TW

Nesta etapa da pesquisa, os(as) respondentes foram questionados(as) quanto ao nível de conhecimento sobre aplicações TW, bem como sobre a opinião quanto ao apoio ao uso de funções TW e supostos benefícios dessa tecnologia. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 1.

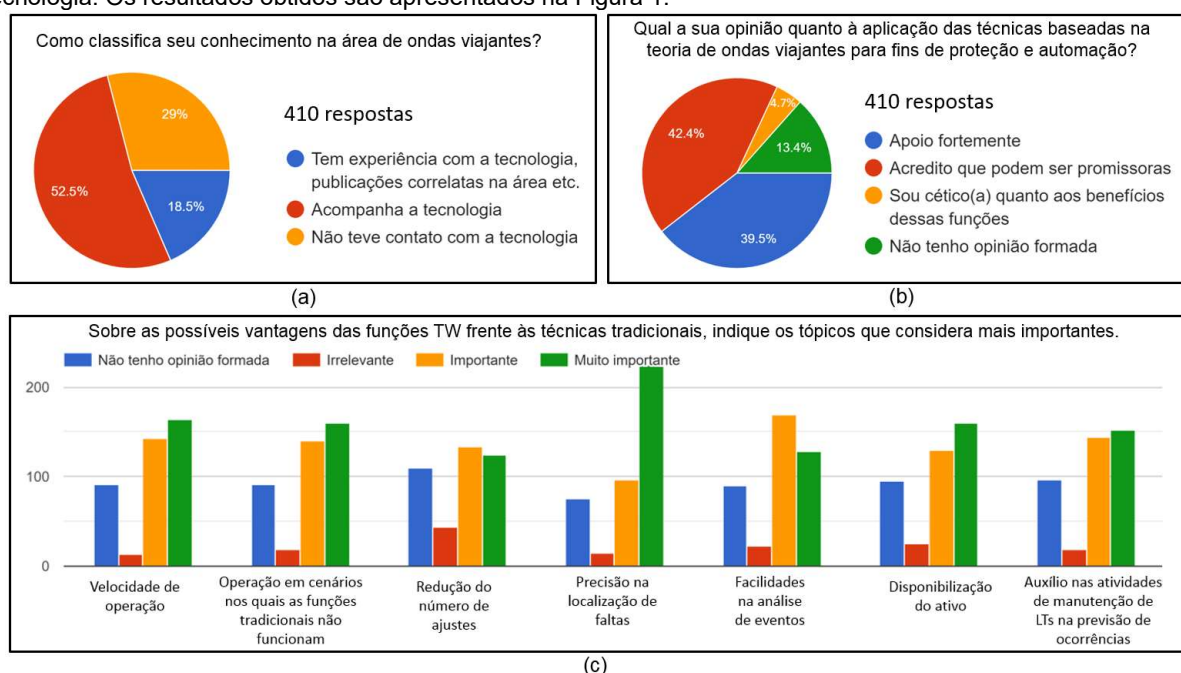


Figura 1 – Respostas da primeira parte do formulário de pesquisa considerando questões sobre: (a) Conhecimento; (b) Apoio à aplicação de funções TW; (c) Núm. de respostas sobre benefícios de aplicações TW.

Analisando a Figura 1(a), nota-se que apenas 18,5% dos(as) respondentes acusou ter experiência no tema, enquanto que 52,5% e 29% alegaram apenas acompanhar a tecnologia TW ou mesmo não ter contato com a mesma, respectivamente. Como conclusão, tem-se que o setor elétrico nacional é ainda inexperiente quanto às aplicações TW, carecendo, portanto, de maior divulgação, formação e consolidação de conhecimento na área. Em relação à Figura 1(b), verifica-se que dentre os(as) respondentes, 39,5% indicou apoiar fortemente a tecnologia, enquanto que 42,4% indicou apenas acreditar que as funções TW podem ser promissoras. Por outro lado, 4,7% dos(as) respondentes alegou ser cético(a) quanto aos benefícios das funções TW e 13,4% afirmou não ter opinião formada sobre o assunto. Tais resultados mostram que, apesar do pouco conhecimento do setor elétrico sobre a tecnologia, existe abertura para ampliação da mesma, visto que boa parte das respostas reportou apoio ao uso das funções TW.

Na Figura 1(c), consideram-se respostas para questionamentos sobre supostos benefícios das funções TW, solicitando-se pela indicação dos mais importantes. Neste caso, segundo os(as) respondentes, a maior vantagem da tecnologia TW ainda é o fornecimento de estimativas precisas de localização de faltas, ficando em segundo plano os benefícios relacionados à velocidade de operação das funções TW de proteção e possibilidade de operação da proteção quando da não atuação de técnicas tradicionais fatoriais (o que culmina em maior disponibilização dos ativos). Ainda assim, o fato da localização de faltas ter se destacado com o maior número de classificações do tipo “Muito Importante” demonstra uma polarização de conhecimento dos(as) respondentes quanto ao histórico dos métodos TW, que de fato se voltavam à princípio unicamente para esquemas localizadores de faltas, e que ao longo dos anos demonstraram ser de fato eficientes. Porém, uma vez que as classificações “Importante” e “Não tenho

opinião formada” apresentaram marcações com números relativamente elevados, nota-se que parte dos(as) profissionais já tem ampliado o conhecimento sobre as vantagens das funções TW, porém com uma parcela ainda significativa de profissionais que desconhecem as potencialidades da tecnologia.

Ainda em relação aos resultados da Figura 1(c), destaca-se que houve liberação de campo livre para indicação de outras vantagens na opinião dos(as) respondentes. Dentre as respostas, destacaram-se: 1) o auxílio na tomada de decisão para religamento de LTs; 2) possibilidade de atuação confiável em sistemas próximos a elos CC, com potencial atuação robusta em casos de falhas de comutação; 3) uso de assinaturas dos transitórios para identificação e classificação de faltas, após o evento e também de forma preditiva; e 4) eliminação do problema de múltiplas localizações quando do uso de vários dispositivos localizadores (pois funções TW são reconhecidamente muito precisas e confiáveis). Por outro lado, um dos respondentes indicou como “desvantagem” a “...falta de concorrentes dentre os fabricantes de relés digitais, encarecendo o produto e diminuindo a livre concorrência...”.

2.2 Resultados quanto a experiências, nível de satisfação e planejamento para uso de aplicações TW

Na segunda parte do formulário de pesquisa, foram contempladas questões voltadas para a checagem de experiências dos(as) respondentes quanto ao uso de funções TW, nível de satisfação e planos para utilização de aplicações TW no cotidiano das suas respectivas empresas. Os resultados são apresentados na Figura 2.

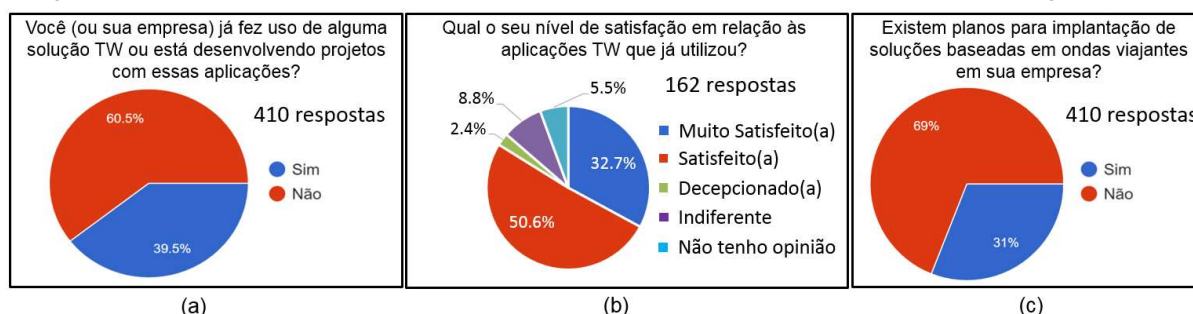


Figura 2 – Respostas da segunda parte do formulário de pesquisa considerando questões sobre: (a) Uso de funções TW; (b) Nível de satisfação; (c) Planos para utilização de aplicações TW.

Sobre os percentuais de utilização de funções TW, nota-se na Figura 2(a) que 39,5% dos(as) 410 respondentes reportaram já ter utilizado alguma aplicação dessa natureza. Esse percentual representa 162 respondentes, que foram encaminhados para uma segunda pergunta relacionada ao nível de satisfação, sendo os resultados apresentados na Figura 2(b). Neste quesito, 32,7% e 50,6% das respostas indicaram classificações “Muito Satisfeito(a)” e “Satisfeito(a)”, demonstrando nível de satisfação elevado. Dentre as demais classificações, destacou-se “Indiferente” com 8,8% e “Não tenho opinião” com 5,5%, restando apenas 2,4% com indicativo de decepção quanto ao uso das tecnologias TW. Com isso, reforça-se ainda mais a percepção de abertura do setor elétrico para expansão das aplicações TW, muito embora, segundo a Figura 2(c), isso não tenha se convertido em iniciativas para tal com mesma proporção. De fato, conforme ilustrado na Figura 2(c), apenas 31% dos(as) respondentes indicou que tem (ou que sua empresa tem) planos para utilização de soluções TW, o que na opinião dos autores se mostra como um percentual pequeno frente aos que alegaram apoio à tecnologia (ver Figura 1(b)). Apesar disso, fica o destaque para a necessidade de iniciativas de propagação do conhecimento e apoio dos órgãos superiores do setor elétrico no sentido de motivar a investigação de tecnologia TW, considerando possíveis ampliações das tecnologias recomendadas para o Sistema Interligado Nacional (SIN) em caso de comprovado desempenho satisfatório.

Ainda em relação aos resultados da Figura 2, é importante mencionar que outras questões foram apresentadas para os(as) respondentes que alegaram já ter usado funcionalidades TW, visando o detalhamento dos sistemas elétricos onde a tecnologia foi aplicada. As indicações foram direcionadas conforme os seguintes aspectos: 1) Sistemas em corrente alternada (CA) ou contínua (CC); 2) Nível de tensão; 3) Tipo de linha; 4) Em caso de linha híbrida, tipo de combinação de trechos; 5) Ambiente de aplicação; e 6) Finalidade de aplicação. Desses quesitos, identificou-se que as aplicações estão mais concentradas em sistemas CA (82,1% de 184 respostas), em nível de tensão de transmissão (80,3% de 188 respostas), e com aplicação predominante em LTs aéreas (80,9% de 193 respostas). Quando consideradas aplicações em LTs híbridas, notou-se predominância de aplicações em LTs compostas por trechos aéreos e subterrâneos (53,6% e 29% de 69 respostas, respectivamente). Ainda, identificou-se que, em termos de ambiente de aplicação, predomina o uso de funções TW para fins de operação típica em sistemas reais e estudos/simulações em laboratório (43,3% e 36,4% de 187 respostas, respectivamente), consistindo principalmente de funcionalidades de localização de faltas e proteção (57,9% e 28,3% de 219 respostas, respectivamente). Por fim, ainda analisando a finalidade da aplicação TW utilizada, foram indicadas com 7,7% e 4,6% o uso de funções TW para localização preditiva de faltas e para fins de automação, respectivamente. Tais resultados demonstram que as funcionalidades TW estão em expansão, a qual, embora ainda incipiente, demonstra ser uma tendência para o futuro.

2.3 Resultados sobre os dispositivos mais utilizados, experiências com comissionamento e dificuldades de aplicação

Na terceira etapa da pesquisa, apresentaram-se questões sobre os dispositivos mais utilizados dentre os que possuem funções TW, sendo incluídos quesitos sobre experiências em procedimentos de comissionamento e sobre dificuldades para aplicação e validação de tecnologias TW. Em todas essas perguntas, foram permitidas marcações múltiplas das opções para averiguação de respondentes com diferentes experiências. Nas Figuras 3, 4 e 5, apresentam-se os resultados do *ranking* dos dispositivos mais utilizados (total de 222 marcações), das formas mais comumente usadas para comissionamento de dispositivos com funções TW (total de 186 marcações), e o quantitativo de indicações das maiores dificuldades para aplicação e validação de tecnologias TW (total de 829 marcações).

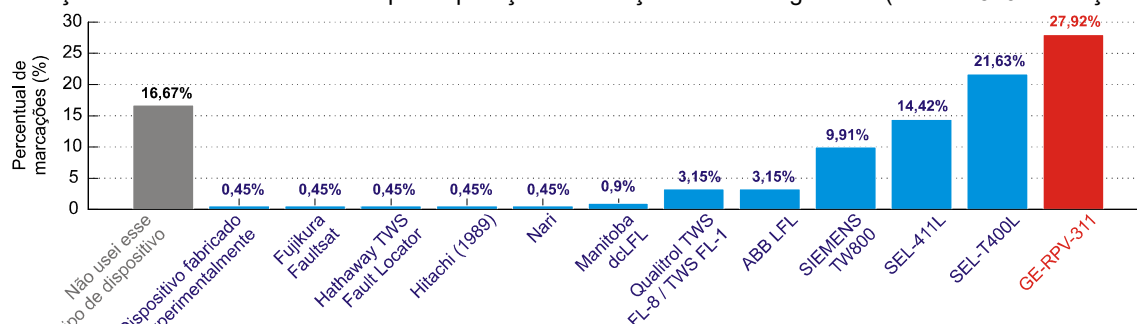


Figura 3 – Respostas quanto aos dispositivos mais usados dentre os equipados com funcionalidades TW.

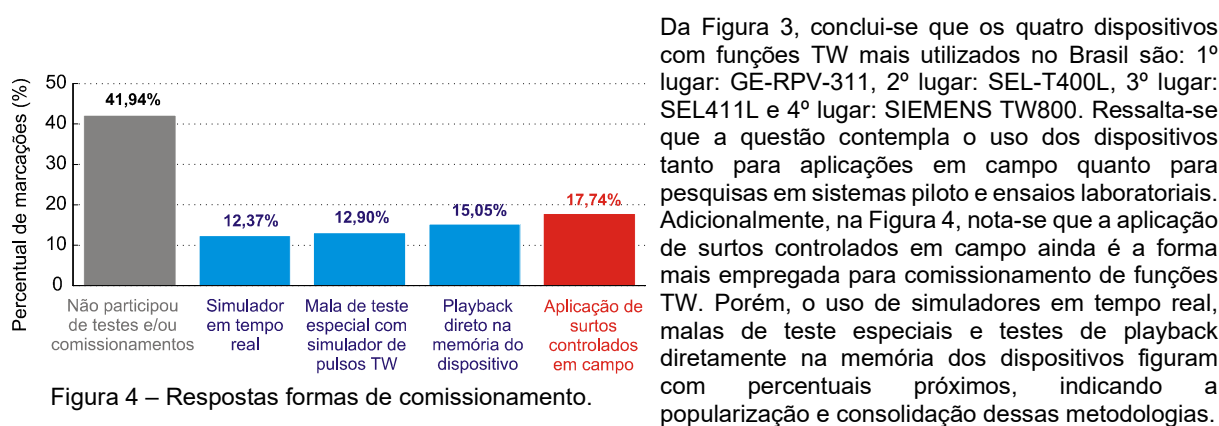


Figura 4 – Respostas formas de comissionamento.

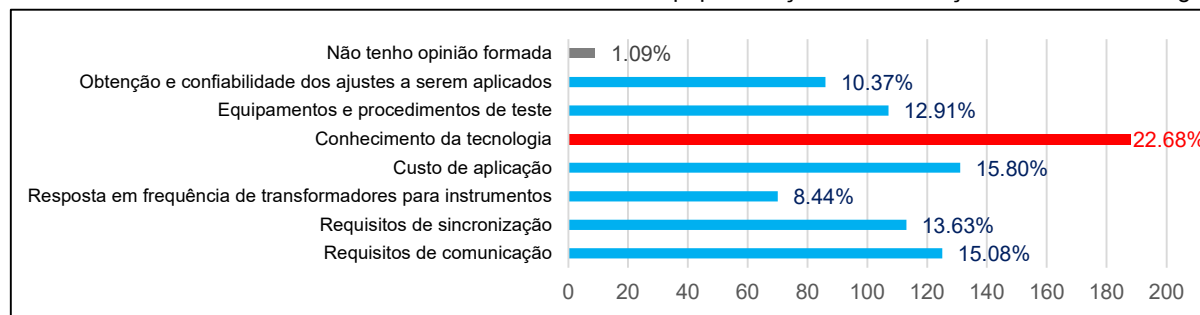


Figura 5 – Respostas quanto às dificuldades mais relevantes para aplicação e validação de funções TW.

Sobre a Figura 5, nota-se que dentre as 829 marcações consideradas, a maior dificuldade para aplicação e validação de funções TW dentre as reportadas consistiu no “conhecimento da tecnologia”, que se mostra ainda relativamente limitado no Brasil, corroborando com os resultados apresentados anteriormente na Figura 1(a). Na sequência dessa problemática, apresentando percentuais muito próximos entre si, identificaram-se como fatores relevantes o “custo de aplicação” (15,80%) e os “requisitos de comunicação” (15,08%). Por fim, também com percentuais próximos entre si, verificaram-se dificuldades relacionadas aos “requisitos de sincronização” de dados (13,63%) e dificuldades quanto aos “equipamentos e procedimentos de teste” (12,91%). Dificuldades relacionadas à “resposta em frequência dos transformadores para instrumentos” implicaram em 8,44% das marcações, sendo essa a dificuldade menos relevante dentre as avaliadas. Por fim, apenas 1,09% marcou a opção “Não tenho opinião formada”.

Diante do exposto, percebe-se que, além da atenção clássica dada aos processos de filtragem empregados na identificação das TWs de interesse, também existe preocupação quanto às dificuldades de comunicação e sincronização de dados, bem como a de promover testes e comissionamento confiáveis dos esquemas TW. Assim, pode-se identificar também uma tendência quanto ao desenvolvimento de tecnologias TW que possam ser robustas a falhas de sincronização e que tenham mais flexibilidade quanto aos requisitos de comunicação, bem como quanto

ao desenvolvimento de soluções confiáveis para testes e comissionamento de funções TW, que ainda se encontram em fase de maturação em certos aspectos. Neste último contexto, a similaridade das marcações na Figura 4 é bastante ilustrativa, pois evidencia a não predominância de uma determinada técnica de teste e comissionamento. Por fim, ressalta-se que foi disponibilizado campo aberto para os(as) respondentes, permitindo que fossem destacados outros fatores dificultadores para aplicação e validação de tecnologias TW. Dentre os comentários, destacaram-se: “Indisponibilidade de registros reais para consolidação de métodos”, “Falta de incentivo regulatório”, “pouca diversidade de fabricantes de dispositivos com funções TW”, “conservadorismo/ceticismo do setor” e “ausência de requisitos obrigatórios nos procedimentos de rede” que estimulem o uso das funcionalidades TW”. Neste contexto, os autores enfatizam que esses foram comentários pontuais, mas que certamente abrem margem para debates no setor elétrico, obviamente primando por aprimoramentos de forma ética e responsável tecnicamente.

2.4 Resultados quanto às perspectivas futuras para aplicações TW

Nesta quarta e última etapa da pesquisa, foram apresentadas questões relacionadas às perspectivas futuras dos(as) respondentes sobre as aplicações TW, indicando o que se espera em termos de novos desenvolvimentos e também se existe planejamento de uso dessa tecnologia no âmbito da empresa do(a) profissional em respondente. Os resultados foram obtidos considerando novamente a possibilidade de múltiplas marcações, sendo apresentados nas Figuras 6 e 7, para as quais foram contabilizadas 685 e 54 marcações, respectivamente.

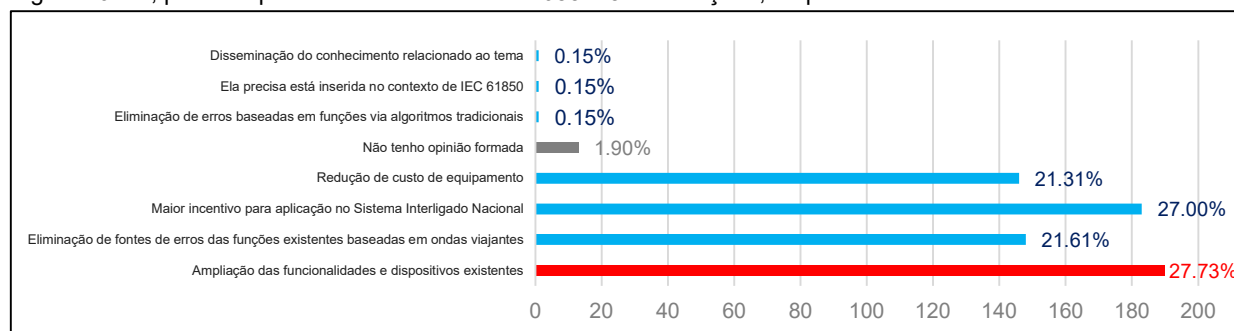


Figura 6 – Respostas quanto às perspectivas futuras para aplicações TW.

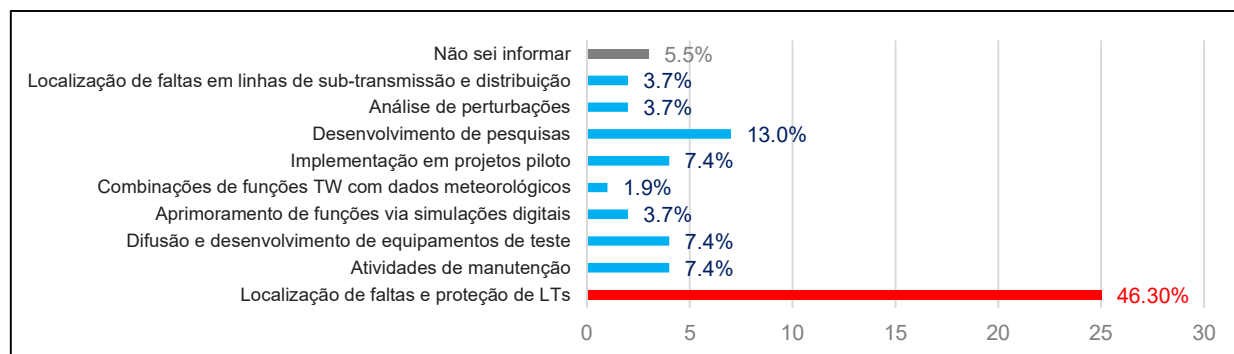


Figura 7 – Respostas quanto ao planejamento para utilização de aplicações TW.

Segundo a Figura 6, dentre as opções para perspectivas futuras, a mais votada foi a “ampliação das funcionalidades TW e dispositivos existentes”. Na sequência, com percentuais próximos, figuraram a “redução de custo dos equipamentos TW”, “maior incentivo para aplicação no SIN” e a “eliminação de fontes de erro das funções TW” existentes. Tais respostas evidenciam o anseio pela ampliação dos sistemas atualmente disponíveis no mercado, o que decorre certamente da satisfação positiva quanto ao desempenho de funções TW, conforme exposto na Figura 2(b). Ademais, de acordo com a Figura 7, apesar dessa perspectiva de ampliação das funcionalidades TW, verifica-se uma predominância de possíveis iniciativas futuras para aplicações TW de localização de faltas e proteção de LTs (46,30%), ficando as demais opções com percentuais significativamente inferiores. Isso se justifica pelo fato de que dispositivos com funções TW disponíveis no comércio contemplam primordialmente funções de localização de faltas e proteção, fazendo com que novas iniciativas se voltem em sua maioria para tais finalidades. Ainda assim, destacam-se os 13% de marcações da opção “Desenvolvimento de pesquisas”, demonstrando que os grupos de estudo voltados para o desenvolvimento e investigação de funções TW se encontram em atividade e em expansão.

3.0 APRENDIZADOS, AVANÇOS RECENTES E TENDÊNCIAS DAS TECNOLOGIAS TW

O contexto da pesquisa apresentada na seção anterior destaca, dentre várias conclusões, a necessidade de maior aprofundamento técnico de pesquisadores e profissionais de empresas do setor elétrico sobre as tecnologias TW. Desse modo, de forma espontânea, tem-se percebido uma ampliação no número de pesquisas conduzidas em âmbito mundial sobre funcionalidades TW, as quais têm viabilizado aprendizados e esclarecimento de questões até então

não abordadas na literatura de maneira aprofundada. Assim, com base nos achados da pesquisa nacional realizada e no estudo da literatura recente sobre tecnologias TW, apresenta-se nesta seção uma revisão de aprendizados e avanços recentes, visando a consolidação das tendências identificadas até então.

3.1 Evolução de filtros TW e de formulações para localização de faltas e proteção

Ao contrário do que muitos pensam, a tecnologia TW não é recente. De fato, desde a década de 1930 existem relatos de estudos sobre funções TW para localização de faltas e proteção de LTs [1]. Em 1972, a *Bonneville Power Administration* (BPA) já reportava suas primeiras aplicações práticas de localização de faltas [5], e desde então muitos avanços foram alcançados. Sem dúvida, o advento da tecnologia digital no sentido de permitir a digitalização de sinais usando frequências de amostragem da ordem de mega-hertz foi um dos fatos mais decisivos na história desses métodos [2], pois permitiu a visualização de transitórios na escala de microssegundos, viabilizando detecções precisas das TWs lançadas por faltas em LTs.

Para facilitar o entendimento sobre a evolução das técnicas TW, apresenta-se na Figura 8 um exemplo de diagrama de Bewley para um sistema hipotético composto por uma LT de comprimento LL que conecta as subestações L e R, aqui representando terminais local e remoto, respectivamente. Na figura, a LT LR é tomada como sendo a linha monitorada, onde ocorre uma falta a uma distância d da Barra L. Ainda, assume-se a presença de LTs adjacentes curtas (LM e RN), destacando os instantes de incidência de TWs incidentes, refletidas e transmitidas nos terminais L e R, que serão considerados para as explicações posteriores, nas quais toma-se a Barra L como referência.

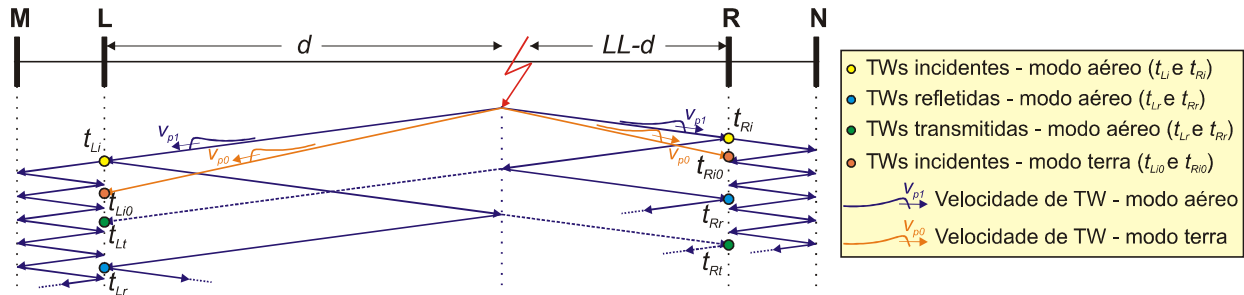


Figura 8 – Diagrama de Bewley para demonstração da propagação de TWs em uma LT.

Dentre os primeiros desenvolvimentos na tecnologia TW, destacaram-se as formulações para localização de faltas apresentadas em (1) e (2), as quais hoje são recorrentemente classificadas como formulações clássicas de um e dois terminais, respectivamente [6]:

$$\text{Um terminal} \rightarrow d = 0,5 \cdot (t_{Lr} - t_{Li}) \cdot v_{p1}, \quad (1)$$

$$\text{Dois terminais} \rightarrow d = 0,5 \cdot [LL - (t_{Ri} - t_{Li}) \cdot v_{p1}]. \quad (2)$$

Em relação às formulações apresentadas, sabe-se que (1) ganhou popularidade rapidamente por não requerer comunicação entre os terminais da LT. Assim, foi considerada em diversos trabalhos para fins de localização de faltas e também de proteção de LTs. Porém, tal como demonstrado na Figura 8, (1) depende da detecção de TWs refletidas no ponto de falta, tarefa essa historicamente tratada como um grande desafio. Realmente, as TWs refletidas na falta incidem nos terminais monitorados em conjunto com outras frentes de onda, tais como as provenientes de LTs adjacentes ou TWs transmitidas através do ponto de falta. Portanto, em virtude da problemática de distinguir de maneira confiável o instante t_{Lr} de t_{Lt} , por exemplo, ou mesmo t_{Rr} de t_{Rt} , em décadas passadas, a formulação de um terminal passou a ficar mais restrita a aplicações de localização de faltas, reduzindo aplicações para proteção e entrando em relativo desuso por vários anos se comparada à metodologia de dois terminais, que só depende da detecção das primeiras TWs incidentes, ou seja, t_{Li} e t_{Ri} . Por isso, (2) passou a ser empregada em aplicações reais, sendo embarcada em sistemas de monitoração associados a RDPs e relés microprocessados, a exemplo do GERPV-311 e SEL 411L que figuram como alguns dos dispositivos mais utilizados no Brasil desde 2008 (ver Figura 3).

Apesar da consolidação de (2) em nível prático, sua aplicação (ou seja, do método de dois terminais clássico) requer sincronização de dados locais e remotos, e do conhecimento dos parâmetros elétricos da LT para cálculo de v_{p1} e/ou v_{p0} . Neste contexto, experiências de casos reais têm mostrado que tais requisitos podem recair em incertezas no momento de aplicação de (2), podendo prejudicar o desempenho do método. Por isso, visando eliminar tais fontes de erro, soluções alternativas de dois terminais têm sido reportadas na literatura, tal como listado na Tabela 1.

Tabela 1 – Métodos alternativos para localização de faltas usando tecnologia TW

Propositores	Ref.	Formulação	Vantagem	Desvantagem
Mahmoud Gilany et al. (2007)	[7]	$d = \frac{LL}{2} \cdot \frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{[(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Ri} - t_{Li})]}$	Livre de ajustes v_{p1}	Detecção de TW refletida
E. O. Schweitzer et al. (2016)	[8]	$d = LL \cdot \frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Lt} - t_{Li})}$	Livre de ajustes v_{p1}	Detecção de TW reflet. e transm.

Felipe Lopes (2016)	[9]	$d = LL \cdot \frac{(t_{Li0} - t_{Li})}{(t_{Li0} - t_{Li}) + (t_{Ri0} - t_{Ri})}$	Sem detecção de TW refletida e livre de ajustes v_{p1} e sincronização	Detecção de TW modo terra
Felipe Lopes et al. (2018)	[10]	$d = LL \cdot \frac{(t_{Lr} - t_{Li})}{(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Rr} - t_{Ri})}$	Livre de ajustes de v_{p1} e sincronização	Detecção de TW refletida
OD Naidu & Pradhan (2019)	[11]	$d = \frac{[(t_{Lr} - t_{Li}) + (t_{Rr} - t_{Ri})] \cdot v_{p1}}{4}$	Livre de sincronização	Detecção de TW reflet. e transm. e ajuste v_{p1}

Da Tabela 1, nota-se que boa parte dos métodos alternativos listados são desenvolvidos de fato com o intuito de eliminar a necessidade de ajustes de velocidade de propagação e/ou da sincronização de dados, sendo essa vertente tecnológica classificada aqui como tendência. Porém, para tornar os algoritmos adaptáveis aos parâmetros da LT e a possíveis erros de alinhamento temporal dos registros, verifica-se que todas as técnicas fazem uso de detecções de TWs adicionais às ondas incidentes, tais como as refletidas e transmitidas no ponto de falta, e TWs de modo terra. Em [12], realizou-se a validação das metodologias TW reportadas em [9] e [10] considerando casos reais. Conforme demonstrado na Tabela 1, o método reportado em [9] faz uso de TWs incidentes de modo aéreo e terra, enquanto que a técnica apresentada em [10] faz uso de TWs incidentes e refletidas de modo aéreo no ponto de falta. Os estudos apresentados demonstram a viabilidade de eliminação de incertezas causadas por variações nos parâmetros elétricos da LT ou mesmo por erros imprevisíveis de sincronização. Ainda assim, com a possibilidade de análise de oscilografias reais com taxas de amostragem de mega-hertz, tem se tornado viável avaliar modelos de LTs em programas do tipo *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), considerando a variação dos parâmetros da LT na frequência. Isso tem viabilizado aprendizados importantes do ponto de vista prático, inclusive sobre o uso de TWs refletidas e de modo terra. De fato, de estudos realizados em [13], demonstra-se que TWs de modo terra podem apresentar níveis de atenuação críticos, que eventualmente podem inviabilizar a sua detecção com precisão em aplicações reais, especialmente em LTs muito longas. Por outro lado, a identificação de TWs refletidas de modo aéreo se mostra mais simples, pois os parâmetros da LT nesse modo resultam em menor atenuação das TWs. Assim, conclui-se que o aprimoramento de funções TW passa também pela possibilidade de identificar com precisão e de forma confiável outras TWs além das incidentes, fato este que tem motivado pesquisadores e fabricantes de RDPs e relés microprocessados a desenvolver técnicas de filtragem TW que permitam a análise de TWs refletidas no ponto de falta e até mesmo TWs de modo terra. Essa vertente tecnológica de desenvolvimento é aqui também considerada como tendência, o que se comprova pela retomada da aplicação do método clássico de um terminal (equação (1)) em dispositivos reais, tais como os relés SEL-T400L e T401L [3], nos quais as frentes de onda refletidas no ponto de falta são identificadas por meio da metodologia reportada em [14]. Nesse contexto, ressalta-se também a retomada de aprimoramentos de outras técnicas de detecção de TWs refletidas, a exemplo de soluções inspiradas nos princípios de correlação entre transitórios de falta que foram largamente utilizadas em décadas passadas [15]-[17].

Ainda considerando a análise da literatura recente, é inevitável perceber o aumento do número de trabalhos voltados para o desenvolvimento de funcionalidades TW de proteção. De fato, com o lançamento dos relés de proteção de LTs SEL-T400L e SEL-T401L [3], nos quais elementos direcionais e diferenciais baseados em TW se encontram embarcados, houve uma quebra de paradigma quanto à possibilidade de aceleração dos esquemas de proteção para tempos de operação da ordem de poucos milissegundos. Com isso, uma série de pesquisas foram impulsionadas, resultando no referido aumento de estudos relacionados à elaboração de funções ultrarrápidas de proteção [18]-[21]. Como consequência, isso também impulsionou estudos sobre os “efeitos colaterais” de tamanha redução nos tempos de operação de relés, especialmente no que se refere à suportabilidade das tecnologias atualmente empregadas nos disjuntores [22]. Assim, considerando o volume de trabalhos encontrados na literatura sobre esses tópicos e a relevância destes na opinião de especialistas da área, considera-se que o desenvolvimento de proteções rápidas também é uma tendência, assim como estudos sobre sua viabilidade e aprimoramentos para disjuntores em situações de aplicação de funções TW ultrarrápidas de proteção.

3.2 Aplicações TW em LTs híbridas

Um tópico que ganhou bastante notoriedade na literatura nos últimos anos no âmbito das tecnologias TW diz respeito à localização de faltas em LTs híbridas para fins de auxílio na automação de procedimentos de religamento. Esta popularização corrobora com resultados obtidos na pesquisa nacional realizada, na qual identificou-se a automatização de sistemas elétricos como uma aplicação de potencial interesse para os(as) respondentes. De fato, quando consideradas faltas nos trechos aéreos de LTs híbridas, é possível que o curto-circuito seja temporário, podendo-se aplicar esquemas de religamento. No entanto, o mesmo não se aplica em situações de curto-circuito em trechos subterrâneos ou submarinos, devendo-se desabilitar o religamento. Assim, a precisão da localização de faltas baseada na teoria das TWs se mostra promissora para aplicações de automatização da habilitação ou bloqueio de esquemas de religamento de LTs híbridas. Porém, pelo fato de trechos aéreos, subterrâneos e submarinos possuírem diferentes parâmetros elétricos, as velocidades de propagação mudam ao longo da LT, requerendo algoritmos adaptados para tais topologias, que sejam capazes de acomodar as não-homogeneidades do sistema.

Diante do exposto, diversas pesquisas têm sido conduzidas em âmbito mundial no sentido de propor técnicas confiáveis de localização de faltas que se adaptem a LTs híbridas com diferentes topologias e combinações de trechos aéreos, subterrâneos e/ou submarinos [23],[24]. Adicionalmente, dispositivos com funções TW de proteção capazes de operar adequadamente em LTs híbridas também têm ganhado espaço na literatura [3], evidenciando que o uso de tecnologias TW neste tipo de linha também pode ser considerada uma tendência. De fato, de acordo com o conhecimento dos autores, os relés SEL-T400L e SEL-T401L já possuem funcionalidades de automação de religamento de LTs híbridas com auxílio de localização de faltas baseada em TW, o que corrobora com a perspectiva de tendência tecnológica apresentada.

3.3 Expansão das funcionalidades TW

Considerando o exposto até então, é notório que as principais aplicações TW utilizadas ao longo da história dos sistemas elétricos têm se voltado majoritariamente para fins de localização de faltas e proteção de LTs. No entanto, é importante destacar que nos últimos anos tem ocorrido uma ampliação das aplicações TW, seja no que se refere aos equipamentos monitorados ou mesmo aos fins da aplicação em questão. Como exemplo, em [25], aplica-se a teoria TW para proteção de barramentos, enquanto de [7], onde se propõe originalmente uma técnica de localização de faltas, pode-se ter como subproduto a estimação do comprimento da LT monitorada. Ademais, ao dissociar a localização de faltas de *triggers* baseados na emissão de *trips* de sistemas de proteção, torna-se possível identificar pontos fracos da rede elétrica, falando-se em “detecção preditiva de faltas” [26]. Ainda, a partir da análise de TWs nos terminais de LTs, também se propõe em [4] uma solução para alinhamento de registros oscilográficos com precisão comparável ao do GPS, viabilizando o cruzamento pós-evento de dados locais e remotos de forma confiável, mesmo quando da ausência de uma referência de tempo comum. Portanto, considerando as referências supracitadas, é perceptível que tem ocorrido uma ampliação das tecnologias TW, sendo esta considerada também uma tendência, a qual coincide com as expectativas demonstradas na pesquisa nacional realizada (ver Figura 6).

4.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentaram-se resultados de uma pesquisa nacional realizada no âmbito do grupo espelho B5.55 do CIGRE Brasil para mapeamento de situação de conhecimento e aplicação de tecnologias TW no setor elétrico. A partir dos resultados, demonstraram-se perspectivas de satisfação, planejamento de aplicações, dificuldades e expectativas futuras. Por fim, realizou-se uma revisão da literatura, dando destaque para avanços tecnológicos, aprendizados sobre tecnologias TW, bem como tendências. Como conclusão, percebe-se que as tendências verificadas a partir da análise da literatura corroboraram com as expectativas demonstradas pelos(as) respondentes da pesquisa nacional realizada, viabilizando um mapeamento bastante abrangente do uso das tecnologias TW no Brasil, e que pode ser considerado para entendimento de avanços em âmbito mundial das funcionalidades TW.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAHA, M., IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault location on power networks*. Springer, 2009.
- [2] SCHWEITZER III, E. O., SKENDZIC, V., GUZMÁN, A., MYNAM, M. V., ETERNOD, J. L., and GONG, Y. “Mystery solved: Five surprises discovered with megahertz sampling and traveling-wave data analysis”, 2019.
- [3] SEL-T400L Instruction Manual. Schweitzer Engineering Laboratories, 2018.
- [4] LOPES, F. V., HONORATO, T. R., CUNHA, G. A., and RIBEIRO, N. S. “Transmission line records synchronization based on traveling waves analysis.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(3), 1892-1902, 2020.
- [5] MARIHART, D. J., and HAAGENS, N. W. “Automatic fault locator for Bonneville Power Administration”. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (No. 6, p. 2261), 1972.
- [6] GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., BINGYIN, X., YAOZHONG, G., CORY, B. J., and BARKER, J. R. G. “Fault location based on travelling waves”. In *1993 Fifth International Conf. on Developments in Power System Protection* (pp. 54-59), 1993.
- [7] GILANY, M., & KHALIL IBRAHIM, D. “Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system”. *IEEE Transactions on power delivery*, 22(1), 82-89, 2006.
- [8] SCHWEITZER, E., GUZMÁN, A., MYNAM, M., SKENDZIC, V., KASZTENNY, B., GALLACHER, C., and MARX, S. “Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves.” In *13th International Conf. on Developments in Power System Protection*, 2016.
- [9] LOPES, F. V. “Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(5), 2296-2298, 2016.
- [10] LOPES, F.V., DANTAS, K.M., SILVA, K.M. AND COSTA, F.B. “Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves,” in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(2), pp.873-880, 2018.
- [11] NAIDU, O. D., AND PRADHAN, A. K. “A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), 505-513, 2018.
- [12] LOPES, F. V., LIMA, P., RIBEIRO, J. P. G., HONORATO, T. R., SILVA, K. M., LEITE, E. J. S., NEVES, W. and ROCHA, G. “Practical methodology for two-terminal traveling wave-based fault location eliminating the need for line parameters and time synchronization.” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(6), 2123-2134, 2019.
- [13] RIBEIRO, L. M., CUNHA, G. A., RIBEIRO, E. P., BRITTO, A. G., and LOPES, F. V. “Analysis of Traveling Waves Propagation Characteristics Considering Different Transmission Line EMTP Models.” In *2020 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)* (pp. 1-6), 2020.
- [14] GUZMÁN, A., KASZTENNY, B., TONG, Y., and MYNAM, M. V. “Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications.” In *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers* (pp. 1-18), 2018.

- [15] CROSSLEY, P. A., and MCLAREN, P. G. Distance protection based on travelling waves. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, (9), 2971-2983, 1983.
- [16] SHEHAB-ELDIN, E. H., and MCLAREN, P. G. "Travelling wave distance protection-problem areas and solutions." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 894-902, 1988.
- [17] REIS, R., LOPES, F., NEVES, W., FERNANDES JR, D., RIBEIRO, C., and CUNHA, G. "An improved single-ended correlation-based fault location technique using traveling waves." *International Journal of Electrical Power & Energy Sys.*, 132, 107167, 2021.
- [18] SCHWEITZER, E. O., KASZTENNY, B., and MYNAM, M. V. "Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In 2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (pp. 1-17), 2016.
- [19] SILVA FRANÇA, R. L., SILVA JÚNIOR, F. C., HONORATO, T., RIBEIRO, J. P. G., COSTA, F. B., LOPES, F. V., and STRUNZ, K. "Traveling wave-based transmission line earth fault distance protection." *IEEE Trans. on Power Del.*, 36(2), 544-553, 2020.
- [20] F. B. COSTA, A. MONTI, F. V. LOPES, K. M. SILVA, P. JAMBORSALAMATI and A. SADU, "Two-Terminal Traveling-Wave-Based Transmission-Line Protection," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1382-1393, 2017.
- [21] Dong, X., Luo, S., Shi, S., Wang, B., Wang, S., Ren, L., and Xu, F. "Implementation and application of practical traveling-wave-based directional protection in UHV transmission lines." *IEEE Trans. on Power Del.*, 31(1), 2015.
- [22] ZUBIC, S., GAJIC, Z., KRALJ, D. "Line Protection Operate Time: How Fast Shall It Be?" *IEEE Access*, 9/75608-75616, 2021.
- [23] LEITE, E. J. S., LOPES, F. V., COSTA, F. B., & NEVES, W. L. A. "Closed-form solution for traveling wave-based fault location on non-homogeneous lines." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(3), 1138-1150, 2019.
- [24] KASZTENNY, B., GUZMÁN, A., MYNAM, M. V., & JOSHI, T. "Locating faults before the breaker opens—Adaptive autoreclosing based on the location of the fault." In 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE) (pp. 1-15), 2018.
- [25] SILVA, K. M., ESCUDERO, A. M. P., LOPES, F. V., and COSTA, F. B. "A wavelet-based busbar differential protection." *IEEE Transactions on power delivery*, 33(3), 1194-1203, 2017.
- [26] KASZTENNY, B., MYNAM, M. V., JOSHI, T., and HOLMBO, D. "Preventing line faults with continuous monitoring based on current traveling waves." In 15th International Conf. on Developments in Power System Protection, (pp. 1-6), 2020.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus sinceros agradecimentos a todos(as) profissionais que compõem o grupo espelho CIGRE B5.55 Brasil, em especial pelo apoio na iniciativa da pesquisa nacional quando da elaboração do formulário de questões e da divulgação deste junto às empresas do setor elétrico. Ademais, expressa-se também um agradecimento especial a todos(as) os(as) respondentes que participaram da pesquisa, que dedicaram atenção e tempo para preenchimento do formulário.

DADOS BIOGRÁFICOS



FELIPE VIGOLVINO LOPES Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), concluídos em 2009, 2011 e 2014, respectivamente, e pós-doutorado pela UFCG em 2018. É Senior Member do IEEE e membro do Comitê de Estudos B5 do Cigré, onde atua como coordenador do grupo espelho Brasil B5.55 que trata sobre tecnologias baseadas na teoria de ondas viajantes. Trabalhou como professor da Universidade de Brasília (UnB) de 2014 a 2021 em níveis de graduação e pós-graduação e, em 2021, assumiu o cargo de professor do quadro permanente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Tem experiência nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Falhas, e Transitórios Eletromagnéticos.



RAPHAEL LEITE DE ANDRADE REIS possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), concluídos em 2013, 2015 e 2019, respectivamente. Realizou intercâmbio em nível de graduação na University of Kentucky, Estados Unidos, em 2012. É membro do Comitê de Estudos B5 do Cigré, onde atua como secretário do grupo espelho Brasil B5.55. Atualmente é Professor do quadro permanente da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão, Proteção de Sistemas Elétricos e Transitórios Eletromagnéticos.