



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

**AValiação de Esquema de Sensoriamento de Custo Reduzido para Aplicações de  
Localização de Falhas em Linhas de Transmissão HVDC**

**FELIPE VIGOLVINO LOPES (1); TIAGO DA ROCHA HONORATO (2);  
DIOGO TOTTI CUSTODIO (3); KLEBER MELO E SILVA(2)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB) (1);  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB) (2);  
IE-MADEIRA (3)**

**RESUMO**

Neste trabalho, analisa-se o desempenho de um esquema de sensoriamento de custo reduzido para emprego em soluções modernas de localização de falhas baseadas na teoria de ondas viajantes, visando aplicações em linhas *High Voltage Direct Current* (HVDC). Para tanto, utilizam-se dispositivos capazes de emular ondas viajantes, injetando nos sensores avaliados transitórios compatíveis com os induzidos por falhas. Desses estudos, demonstra-se a boa resposta do sensor testado e a possibilidade de controle de ganho sem perda de precisão, comprovando sua viabilidade para aplicações modernas de localização de falhas para linhas HVDC que podem ser vantajosas frente às soluções tradicionalmente empregadas.

**PALAVRAS-CHAVE**

HVDC, linhas de transmissão, localização de falhas, ondas viajantes, sensoriamento.

**1.0 INTRODUÇÃO**

O aumento da demanda por energia elétrica tem imposto às concessionárias, órgãos fiscalizadores e órgãos de operação diversos desafios técnicos, dentre os quais a transmissão de energia elétrica por longas distâncias tem sido um tópico recorrentemente debatido. No Brasil, por questões econômicas e técnicas, as linhas de transmissão (LTs) HVDC têm figurado como a tecnologia escolhida para a transmissão de energia elétrica a distâncias acima de 700 km [1]. Neste contexto, destaca-se a LT HVDC  $\pm 600$  kVcc do Complexo do Madeira, Bipolo 1, sob o regime de concessão da empresa Interligação Elétrica do Madeira (IE-Madeira), que é usada neste trabalho como sistema de referência.

O referido elo HVDC do Complexo do Madeira é responsável pela interligação das subestações Coletora Porto Velho (CPV) e Araraquara (ARA), possuindo comprimento da ordem de 2450 km [2]. Em virtude da dimensão continental dessa LT, a localização de falhas tem sido tarefa crucial para a retomada do serviço quando da ocorrência de curtos-circuitos [3]. Tal fato tem motivado a modernização dos sistemas localizadores de falhas atualmente empregados, visando viabilizar cálculos cada vez mais precisos e robustos frente a fontes de erro típicas.

Em LTs HVDC, os métodos de localização de falhas baseados na teoria de ondas viajantes (TW, do termo em inglês *Traveling Waves*) são os mais empregados [3],[4]. Para tanto, utilizam-se medições de tensão e/ou corrente sob taxas elevadas de amostragem, que permitem a identificação dos instantes de incidência das TWs lançadas a partir do ponto de falta. Com isso, torna-se possível calcular a distância do defeito com precisão típica de 2 a 3 vãos de torre. Porém, uma vez que a modernização dos sistemas de localização de falhas baseados em TW (LFTW) depende do pronto acesso a medições imediatamente após a ocorrência do curto-circuito, dificuldades são verificadas quando da impossibilidade de conexão dos sensores de tensão e corrente em novos dispositivos de LFTW, ou quando sensores e LT HVDC são de proprietários distintos. Assim, embora a aquisição de novos sensores seja uma solução direta, esta envolve o dispêndio de investimentos elevados, tornando esta abordagem potencialmente inviável em alguns cenários práticos.

Visando contornar as dificuldades acima mencionadas sobre os aspectos relativos à modernização dos sistemas de LFTW, soluções alternativas de baixo custo para sensoriamento de sinais em LTs HVDC têm sido utilizadas. No Bipolo 1 do Complexo do Madeira, por exemplo, utiliza-se uma coluna capacitiva de medição aterrada, equipada com sensor de corrente de custo reduzido, o qual fornece medições para um sistema de LFTW composto basicamente por uma placa de circuito eletrônico dedicada ao processamento das medições do sensor para detecção dos primeiros transitórios de falta [5]. Esse sistema se baseia na técnica de LFTW clássica de dois terminais, a qual depende da detecção das primeiras frentes de onda incidentes nos terminais local e remoto da LT, fazendo-se necessária a sincronização de dados locais e remotos, e ainda o conhecimento de parâmetros elétricos da LT para cálculo da velocidade de propagação das TWs, que é parâmetro de ajuste da referida solução.

Segundo a literatura, a necessidade por dados sincronizados e por ajustes de velocidade de propagação consiste em fonte de incertezas para procedimentos de LFTW em aplicações práticas, podendo culminar em erros relevantes nas estimativas calculadas [6]. Assim, soluções de LFTW modernas têm sido propostas com o objetivo de contornar tais problemáticas, tornando a localização de faltas capaz de operar de forma precisa, independentemente da sincronização de dados e do conhecimento dos parâmetros elétricos da LT [7]. Porém, para isso, a análise de outras TWs além das primeiras incidentes se faz necessária, tarefa esta que é dificultada se os sinais transitórios originais do sistema forem previamente distorcidos por filtros ou se não estiverem disponíveis para pronta análise.

Entendendo então que a modernização dos sistemas de LFTW depende do acesso às medições originais, e que limitações financeiras para investimentos em novos sensores podem existir, neste trabalho, realiza-se um estudo sobre o sensor de baixo custo atualmente empregado no Bipolo 1 da LT HVDC do Complexo do Madeira, porém avaliando a sua possível aplicação em conjunto com um dispositivo registrador moderno, que possui taxa de amostragem compatível com técnicas de LFTW e que permite o registro de oscilografias dos sinais originais obtidos da coluna capacitiva de medição, sem aplicação de filtros nas entradas analógicas do dispositivo em adição aos filtros *anti-aliasing* tradicionais que são indispensáveis no processo de digitalização das medições. Portanto, diferentes testes são realizados usando equipamentos apropriados para comissionamento de soluções de LFTW, demonstrando a viabilidade do esquema de sensoriamento de baixo custo analisado para aplicação de soluções modernas que requerem a detecção de outras TWs além das primeiras incidentes. Desse modo, comprova-se a possibilidade de modernização dos sistemas de LFTW até então empregados, sem que haja necessidade de aquisição de novos sensores tradicionais para o bipolo HVDC analisado.

## 2.0 MEDIÇÕES DE TRANSITÓRIOS NO ELO HVDC DO COMPLEXO DO MADEIRA (BIPOLO 1)

Conforme descrito anteriormente, no bipolo 1 da LT HVDC analisada, o sistema de LFTW faz uso do esquema de sensoriamento de baixo custo abordado neste artigo, o qual é apresentado na Figura 1. Na Figura 1(a), ilustra-se um dos polos da LT em questão, demonstrando a forma de conexão da coluna capacitiva na qual se inserem os sensores de baixo custo usados na aquisição dos sinais de interesse. Os sensores consistem em transformadores de corrente (TCs) da marca Bergoz, modelo CTF0.1, o qual é ilustrado na Figura 1(b). Esse TC possui tensão de saída que reproduz a forma de onda de corrente passante no condutor monitorado, possuindo relação de transformação nominal de 0,1. Ademais, para detecção das primeiras TWs incidentes induzidas pela falta, necessita-se de um sinal de *trigger* para comando de localização de faltas no sistema. Assim, conforme reportado em [5], aplica-se um detector passivo, implementado em placa de circuito ilustrada na Figura 1(c), que ativa o algoritmo de localização de faltas na linha, considerando sincronização de dados locais e remotos via *Global Positioning System* (GPS).

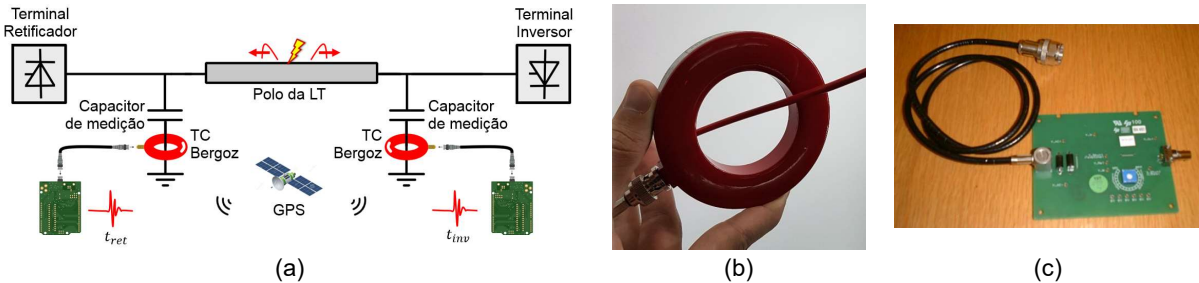


Figura 1 – Esquema de sensoriamento de baixo custo da LT HVDC do Madeira:

(a) Esquema de interligação; (b) TC Bergoz CTF0.1; (c) Detector passivo de TW com saída óptica [5].

Para entender o esquema de sensoriamento ilustrado, é importante relembrar os conceitos fundamentais dos capacitores. Sobre esses elementos, sabe-se que as correntes são proporcionais ao produto da capacitância pela derivada da tensão, sendo esta última operação derivativa equivalente a um filtro passa altas, pois atenua variações lentas, porém permitindo a passagem de transitórios rápidos nos sinais de tensão. Assim, a corrente medida pelo TC Bergoz na coluna capacitiva já consiste na representação de um sinal filtrado em que estão presentes transitórios de tensão, sendo a referida corrente dada por:

$$i = C \cdot \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

onde  $i$  é a corrente passante pelo TC,  $v$  é a tensão no polo monitorado e  $C$  é a capacitância da coluna capacitiva, a qual no Bipolo 1 da LT HVDC analisada é de 2900 pF. Para exemplificar os sinais obtidos a partir do TC Bergoz na LT em questão, na Figura 2, ilustram-se os sinais de tensão no polo negativo da LT HVDC e as correntes passantes no TC da coluna capacitiva, considerando uma falta na segunda metade da LT em relação ao ponto de medição.

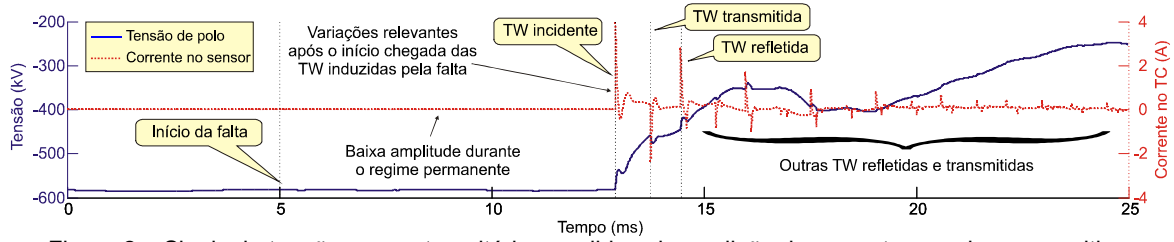


Figura 2 – Sinais de tensão e seus transitórios medidos via medição de corrente na coluna capacitiva.

Do exposto, nota-se que as correntes na coluna capacitiva apresentam baixa amplitude durante o regime permanente, mas apresentam variações relevantes após a chegada das frentes de onda no terminal monitorado, o que permite a detecção das TWs pelo detector passivo ilustrado na Figura 1(c). Ainda, nota-se que a referida corrente representa apropriadamente as variações abruptas no sinal de tensão, que se relacionam com o instante de incidência das primeiras TWs incidentes e também com variações relacionadas a TWs refletidas e transmitidas no ponto de falta. Portanto, os sinais originais das correntes passantes pela coluna capacitiva são ricos em informações sobre as TWs de tensão que se propagam na LT HVDC, fato este que justifica o interesse por uma solução que permita a aquisição dos sinais “brutos” da coluna capacitiva, sem distorções causadas por filtragens preliminares que possam modificar as informações originalmente disponíveis nas correntes medidas.

### 3.0 EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS LFTW E BENEFÍCIOS ASSOCIADOS

Atualmente, o método de LFTW mais empregado em sistemas reais consiste na abordagem clássica de dois terminais. Nesta solução, considerando LTs HVDC, detecta-se basicamente a primeira TW incidente no terminal retificador (aqui tratado como terminal local) e a primeira TW no terminal inversor (aqui tratado como terminal remoto), resultando na identificação dos instantes  $t_{ret}$  e  $t_{inv}$  ilustrados na Figura 1(a). Em posse desses instantes, o método clássico de LFTW de dois terminais é aplicado, utilizando-se a seguinte fórmula para cálculo da distância  $d$  de falta:

$$d = \frac{L - (t_{inv} - t_{ret}) \cdot v_p}{2}, \quad (2)$$

onde  $L$  é o comprimento da linha,  $d$  é a distância de falta em relação ao terminal retificador e  $v_p$  é a velocidade de propagação das TWs na LT, sendo essa estimada tipicamente por:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{lc}}, \quad (3)$$

em que  $l$  e  $c$  representam a indutância série e capacitância em derivação por unidade de comprimento da LT.

De (2) e (3), nota-se que o método de LFTW de dois terminais cruza informações de ambos os terminais da linha, requerendo a sincronização de dados, que é tipicamente realizada por meio do sistema GPS. Adicionalmente, a velocidade de propagação  $v_p$  é função de parâmetros elétricos da LT, ou seja,  $l$  e  $c$ , os quais podem apresentar desvios em virtude de sua variação na frequência e sob condições ambientais distintas [6]. Desse modo, algoritmos de LFTW têm evoluído no sentido de eliminar a influência dessas fontes de erro [7]. No entanto, para viabilizar tais aplicações, torna-se necessária a obtenção de informações adicionais sobre o evento, as quais podem ser obtidas a partir da detecção de TWs refletidas e/ou transmitidas no ponto de falta. Tal fato reforça a intenção de evitar distorções prévias nos sinais de corrente medidos pelo TC da coluna capacitiva, porém mantendo uma taxa de amostragem elevada que permita a análise dos transitórios em escala de microssegundos.

Obviamente, qualquer solução de sensoriamento que vislumbre aplicações de LFTW deve ter capacidade comprovada de representar transitórios em faixas do espectro de frequência compatíveis com os filtros de detecção TW empregados, especialmente quando se trata da aplicação de soluções modernas que requerem a análise de TWs refletidas e transmitidas no ponto de falta. Para ilustrar a importância da representação correta dos transitórios evitando distorções preliminares, sejam elas devido à resposta transitória dos dispositivos de medição, à taxa de amostragem ou à aplicação de filtros passa-banda adicionais já nas entradas analógicas de dispositivos registradores, ilustram-se na Figura 3 oscilografias de um mesmo evento, porém sob taxas de amostragem distintas, a saber, 10 kHz (Figura 3(a)) e 1 MHz (Figura 3(b)). Ressalta-se que a análise das diferentes taxas é apresentada para fins meramente didáticos, visando facilitar a compreensão de situações em que se perde a capacidade de representação de transitórios em virtude de características operacionais dos esquemas de medição e registro de oscilografias. Analisando a figura, percebe-se que, em ambos os registros, os primeiros transitórios induzidos pela falta são visualmente perceptíveis, mas apenas no registro com frequência de amostragem de 1 MHz é possível observar as variações de alta frequência subsequentes que se fazem presentes no sinal monitorado após os primeiros transitórios de falta decorrentes das primeiras TW incidentes. Esses transitórios se referem aos instantes de incidência de TWs refletidas e transmitidas no ponto de falta, os quais são avaliados em metodologias modernas capazes de eliminar a necessidade de sincronização de dados e do conhecimento de parâmetros da LT [7]. Assim, ao avaliar o desempenho do TC Bergoz que compõe o esquema de sensoriamento de baixo custo da LT HVDC analisada, é crucial verificar a capacidade de reprodução de transitórios rápidos, tais como os induzidos por TWs que

incidem nos terminais monitorados em instantes próximos entre si, bem como questões de ganho e relação de transformação, que podem interferir na capacidade de sinais provenientes do TC serem empregados no comando de *trigger* para gravação de oscilografias em dispositivos registradores disponíveis no comércio.

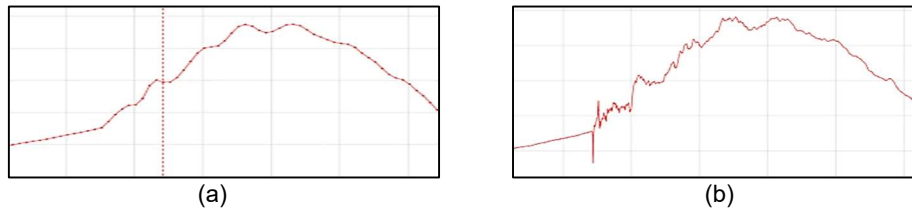


Figura 3 – Influência da taxa de amostragem nos transitórios posteriores às primeiras TW incidentes:

(a) Frequência de amostragem de 10 kHz; (b) Frequência de amostragem de 1 MHz.

#### 4.0 TESTES DO ESQUEMA DE SENSORIAMENTO DE BAIXO CUSTO

##### 4.1 Dispositivos empregados e Metodologia de Teste

Considerando os requisitos de aquisição de registros oscilográficos apresentados até então, ou seja, obtenção de formas de onda originais das correntes na coluna capacitiva ilustrada na Figura 1(a), fez-se uma busca entre dispositivos registradores disponíveis no comércio com taxa de amostragem compatível com soluções de LFTW. Dentre as opções identificadas, notou-se que vários modelos aplicam filtros passa-banda diretamente nas entradas analógicas além dos filtros *anti-aliasing* tradicionais, impondo distorções indesejadas aos sinais de interesse. No entanto, identificou-se que os relés SEL-T400L e SEL-T401L se mostram viáveis para a aplicação vislumbrada, pois discretizam os sinais de entrada em suas versões originais, fazendo uso apenas de filtros *anti-aliasing* tradicionais com frequência de corte em 400 kHz, e aplicando apenas filtros de natureza digital posteriormente à amostragem das formas de onda para fins *trigger* da gravação. Sendo assim, neste trabalho, adotou-se o relé SEL-T400L [8], cuja escolha se deu pelo fato deste modelo se encontrar disponível no Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE) da Universidade de Brasília (UnB), onde os testes apresentados nas próximas seções foram realizados. Neste contexto, deve-se destacar que, mesmo sendo um relé originalmente desenvolvido para sistemas que operam em corrente alternada, o SEL-T400L pode ser empregado como dispositivo registrador em LTs HVDC, desde que seguidas adaptações de interligação, conforme sugerido em [3].

Uma vez definido o dispositivo registrador a ser utilizado, foi elaborada a metodologia para teste do desempenho do TC Bergoz frente a diferentes aspectos relacionados à medição de transitórios com forma condizente com os induzidos pela incidência de TWs em LTs HVDC. Para tanto, foram usados os dispositivos de teste ilustrados na Figura 4, consistindo de um osciloscópio digital Agilent Technologies DSO1002A, um gerador de sinais Hewlett-Packard e o testador TW de modelo SEL-T4287 [8]. As etapas de teste são listadas e justificadas nas seções a seguir, consistindo em: 1) Teste de sensibilidade do SEL-T400L para *trigger* de gravação de registros oscilográficos; 2) Teste de relação de transformação e definição de ganho para sensibilização de *trigger*; 3) Teste de representação de TWs consecutivas; e 4) Teste de playback via PSCAD para simulação de *trigger* de gravação.

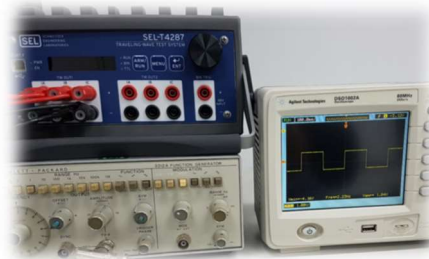


Figura 4 – Dispositivos de teste empregados.

##### 4.2 Teste de Sensibilidade do SEL-T400L para *Trigger* de gravação de registros oscilográficos

Conforme abordado em seções anteriores, a modernização dos esquemas de LFTW depende da disponibilidade de medições “brutas”, que sejam passíveis de análise. Desse modo, a geração de oscilografias via SEL-T400L em casos de falta se mostra crucial do ponto de vista das aplicações modernas vislumbradas, fazendo-se necessária uma análise de sensibilidade do dispositivo em termos de valor mínimo de disparo do seu módulo registrador.

Segundo [8], o SEL-T400L possui lógica de disparo de gravação de eventos configurável, sendo ajustada tipicamente em aplicações de LFTW com base na verificação de variações rápidas nas saídas de seus filtros digitais empregados na análise de TWs. Uma vez que o TC Bergoz tem entrada em forma de corrente, mas saída em forma de tensão, avaliou-se o *trigger* com base unicamente na variável *Traveling Wave Voltage Disturbance Detector* (TWVDD), a qual muda de estado lógico sempre que a soma das saídas do filtro TW *differentiator-smoother* (DS) em todas as fases

do sistema excede um limiar estimado com base no ruído elétrico presente nas formas de onda [8]. Assim, optou-se por utilizar inicialmente o esquema de teste ilustrado na Figura 5, fazendo uso do gerador de sinais para injeção de degraus no SEL-T400L, e de osciloscópio digital para aferição e controle da amplitude dos degraus avaliados.

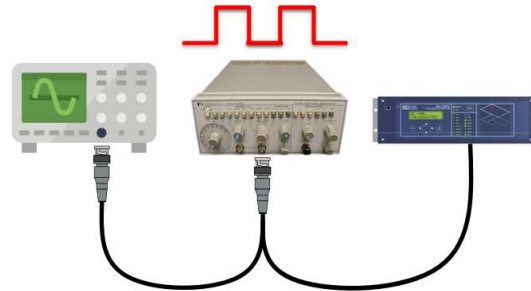


Figura 5 – Esquema de interligação para teste de sensibilidade do SEL-T400L para *trigger* de oscilografias. As formas de onda obtidas em todos os testes executados foram analisadas fazendo uso da plataforma SEL *Synchrowave Event* [8], a qual, nos estudos realizados, fez leitura de sinais de tensão capturados pelo relé em escala de quilovolts. Assim, neste primeiro momento, considerando que o TC Bergoz avaliado possui relação de transformação nominal de 0,1 (tipo CTF0.1), bem como estando cientes de que os registros de tensão apresentam sinais expressos em quilovolts no *Synchrowave Event*, concluiu-se que sinais de tensão apresentariam fator de divisão dado por 10000 (ou seja, 0,1/1000). Assim, configurou-se intencionalmente no SEL-T400L uma relação de transformação fictícia nos canais de tensão como sendo 10000, compensando as relações de transformação do TC e da representação das tensões em quilovolts. Ademais, para aferir todos os canais do dispositivo, foram aplicados diferentes degraus nas fases de entrada do SEL-T400L, sendo os resultados obtidos ilustrados na Figura 6 a seguir.

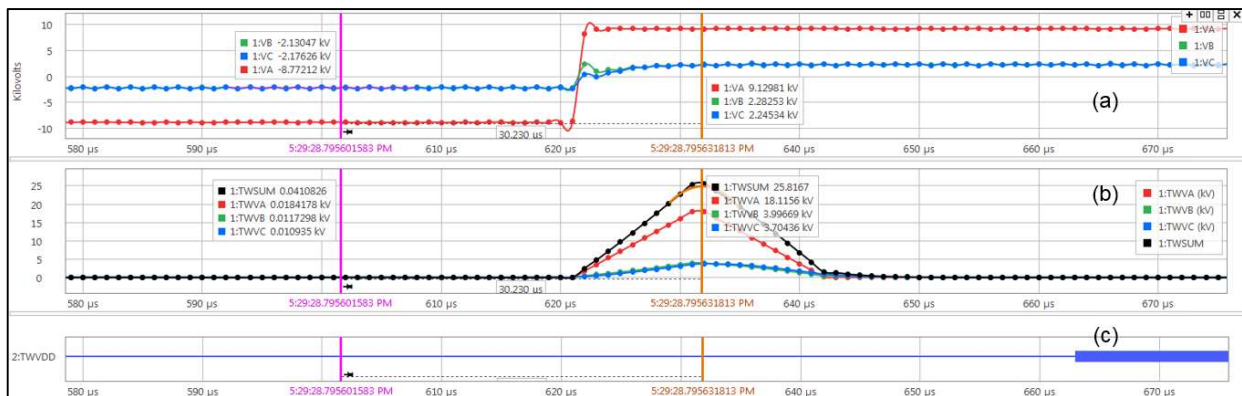


Figura 6 – Resultados do teste de sensibilidade do SEL-T400L para *trigger* de oscilografias: (a) Degraus de entrada; (b) Saídas do filtro DS usadas na ativação de TWVDD; (c) TWVDD.

Após variar as amplitudes dos degraus emulados via gerador de sinais, verificou-se que o SEL-T400L teve o TWVDD ativado quando as amplitudes dos degraus nas entradas das fases A, B e C atingiram níveis pico a pico equivalentes a  $9,12981 - (-8,77212) = 17,90193$  V,  $2,28253 - (-2,13047) = 4,4130$  V e  $2,24534 - (-2,17626) = 4,4216$  V, respectivamente. Uma vez que o filtro digital DS tem aproximadamente ganho unitário com saídas em forma triangular para variações em degrau com baixos níveis de atenuação (ou seja, formas de rampa íngreme), foram obtidas saídas filtradas com valores de pico próximos aos das entradas, resultando em uma soma das TW (aqui representada por TWSUM) com valor de aproximadamente 25,8167 kV. Ao considerar as relações de transformação cabíveis, tal resultado significa que haverá ativação de TWVDD para um TWSUM de 2,58167 V (ou seja,  $25,8167 \cdot 1000 \text{ V} / 10000$ ) quando do uso do TC Bergoz. Cientes disso, passou-se para uma nova etapa de avaliação de estratégias de ajuste de ganho para sensibilização do dispositivo registrador, considerando situações em que as TWs possam apresentar atenuações.

#### 4.3 Teste de Relação de Transformação e Definição de Ganho para Sensibilização de *Trigger*

Na seção anterior, identificou-se que o relé SEL-T400L apresentou nos casos avaliados sensibilidade de disparo da variável TWVDD em aproximadamente 2,5 V, podendo este limiar variar, a depender do nível de ruído no sistema. No entanto, muito embora os ruídos elétricos em LTs apresentem tipicamente níveis relativamente baixos em comparação à amplitude dos sinais transitórios de interesse, estes são difíceis de prever, tornando-se importante a verificação de possíveis ajustes de ganho das medições realizadas por meio do TC Bergoz na coluna capacitiva da LT HVDC, checando a precisão do sensor em termos de relação de transformação para diferentes situações.



Para realização desta etapa, definiu-se como teste a injeção de transitórios em forma de TWs no SEL-T400L, realizando-se a comparação entre os sinais injetados e os sinais medidos por meio do TC Bergoz. Ademais, sabendo que o ganho das medições obtidas a partir do TC Bergoz pode ser ajustado dando-se voltas do condutor por onde flui a corrente a ser medida em volta do TC, foram consideradas também diferentes situações de ajuste, assumindo cenários de 1 a 7 voltas no TC. Tal experimento emula a passagem de transitórios pela coluna capacitiva de medição da LT HVDC, permitindo a checagem da precisão do TC quando considerados diferentes ajustes de ganho. O arranjo montado para os testes é ilustrado na Figura 7, no qual se fez uso do testador TW SEL-T4287 [8]. Ainda, na Figura 8, ilustram-se exemplos do arranjo quando consideradas 1 e 2 voltas do condutor em torno do TC.

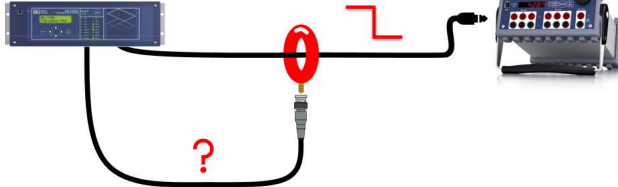


Figura 7 – Experimental para verificação de relações de transformação e ajuste de ganho do TC Bergoz.



(a)

(b)

Figura 8 – Arranjos para teste de diferentes ajustes de ganho do TC Bergoz: (a) 1 volta; (b) 2 voltas.

Os resultados obtidos nesta etapa são ilustrados na Figura 9, onde são apresentadas as formas de onda medidas pelo TC Bergoz para os diferentes números de voltas do cabo condutor em volta do TC (Figura 9(a)), a razão calculada entre o sinal de entrada e o de saída medido pelo TC (Figura 9(b)), e o comportamento da variável TWVDD para os diferentes cenários de ajuste de ganho (Figura 9(c)). É importante ressaltar que, neste teste, o testador TW foi configurado para injetar TWs de corrente referentes a uma situação de falta entre condutor e terra, para uma distância de 30 km em relação a um ponto de medição de referência em uma linha hipotética de 100 km.

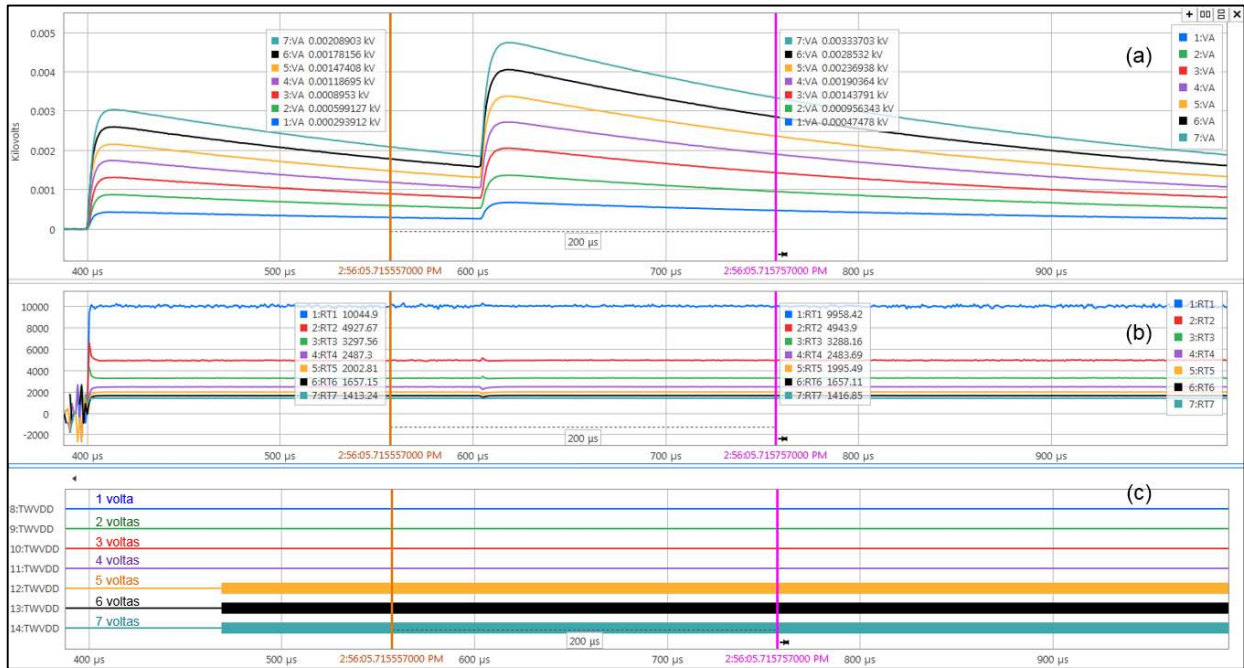


Figura 9 – Resultados da análise de relação de transformação e ajuste de ganho: (a) TWs medidas; (b) Relações de transformação calculadas; (c) Disparo de TWVDD.

Analisando a Figura 9, nota-se que as TWs medidas se assemelham em seus formatos, apresentando apenas diferentes ganhos, conforme esperado para os diferentes testes realizados com números de voltas distintos do cabo condutor em volta do TC. Nas legendas da Figura 9, os índices de 1 a 7 se referem ao número de voltas do condutor no TC em cada caso, podendo-se então verificar que quanto maior o número de voltas, maior é o ganho aplicado às medições do TC. Para avaliar a coerência dos ganhos verificados, deve-se entender que, assumindo um dado sinal de corrente de entrada  $i_{in}$  e considerando que o número de voltas do condutor em volta do TC é  $n_{voltas}$ , tem-se um sinal de tensão de saída  $v_{out}$  (em kV, conforme visualizado no *Synchrowave Event*) dado por:

$$v_{out}(\text{kV}) = 0,1 \cdot n_{voltas} \cdot i_{in}(\text{A}) . \quad (4)$$

Transformando a tensão de saída para volts e assumindo que um ganho  $G = \frac{v_{out}(V)}{i_{in}(A)}$  deve ser avaliado, tem-se que:

$$v_{out} \cdot 1000 (V) = 0,1 \cdot n_{voltas} \cdot i_{in}(A) \rightarrow G = \frac{v_{out}(V)}{i_{in}(A)} = \frac{0,1 \cdot n_{voltas}}{1000} = \frac{n_{voltas}}{10000}. \quad (5)$$

Portanto, tomando  $i_{in}$  como referência no cálculo da relação de transformação, e sabendo que  $i_{in}$  possui amplitude maior do que  $v_{out}$ , adota-se como relação de transformação a razão  $RT = \frac{i_{in}}{v_{out}} = \frac{1}{G} = \frac{10000}{n_{voltas}}$ . Na Figura 9(b), ilustram-se os valores de  $RT$  em dois instantes, cuja média é comparada com os respectivos valores teóricos na Tabela 1:

TABELA 1 – Erro percentual dos ganhos ajustados nos ensaios

Número de voltas $n_{voltas}$	$RT$ calculado na Figura 9(b) pela média dos valores nos dois instantes avaliados	Ganho $G$ teórico	$RT = \frac{1}{G}$ teórico	Erro percentual de $RT$ ( $\epsilon = \left  \frac{RT_{teórico} - RT_{calculado}}{RT_{teórico}} \right  \cdot 100\%$ )
1	10001,66	0,0001	10000,00	0,02%
2	4935,78	0,0002	5000,00	1,28%
3	3292,86	0,0003	3333,33	1,21%
4	2485,49	0,0004	2500,00	0,58%
5	1999,15	0,0005	2000,00	0,04%
6	1657,13	0,0006	1666,67	0,57%
7	1415,05	0,0007	1428,57	0,95%

Avaliando os resultados obtidos, percebe-se que os erros percentuais não excederam a ordem de 1,28% no pior caso demonstrando a possibilidade de ajuste do ganho do TC Bergoz sem que haja perda de precisão na representação das formas de onda de interesse. Ainda, analisando agora a Figura 9(c), nota-se que a sensibilização da variável TWVDD ocorreu apenas a partir do caso de 5 voltas no TC, resultando em  $RT$  teórico de 2000, conforme demonstrado na Tabela 1. Tal resultado está condizente com os achados iniciais da primeira etapa de teste, na qual identificou-se sensibilidade de *trigger* do SEL-T400L para tensões da ordem de 2,5 V no sistema testado. De fato, uma vez que o testador injeta TWs de corrente com amplitude da ordem de 5 A, tem-se que a tensão de saída do TC Bergoz será da ordem de:

$$v_{out} = 0,1 \cdot n_{voltas} \cdot 5 \rightarrow v_{out} = 0,5 \cdot n_{voltas}, \quad (6)$$

de modo que para atingir o nível de 2,5 V,  $n_{voltas}$  deve ser de:

$$2,5 = 0,5 \cdot n_{voltas} \rightarrow n_{voltas} = 5 \text{ voltas}, \quad (7)$$

confirmando a sensibilidade identificada anteriormente e demonstrando a possibilidade de ajuste de ganho para obtenção de diferentes  $RT$  capazes de sensibilizar o *trigger* do dispositivo registrador, sem perda de precisão.

#### 4.4 Teste de Representação de TWs Consecutivas

Até então, demonstrou-se a possibilidade de sensibilização do relé SEL-T400L para fins de operação como registrador de eventos visando obter as formas de onda originais das correntes transitórias que fluem nas colunas capacitivas de medição da LT HVDC em estudo. Porém, visto que a modernização dos sistemas de LFTW requer a identificação de TWs refletidas e/ou transmitidas no ponto de falta, é de suma importância avaliar a precisão do TC Bergoz na medição de TWs consecutivas separadas por períodos de tempo com diferentes ordens de grandeza.

Para realizar a análise supracitada, considerou-se novamente uma LT hipotética de 100 km, a partir da qual foram geradas duas frentes de onda consecutivas por meio do testador TW SEL-T4287 [8], referentes a TWs incidentes e refletidas em faltas do tipo condutor-terra a diferentes distâncias do terminal de medição, a saber, 5, 10, 30, 50, 70 e 90 km. A distância de 5 km é tomada como a mais crítica dentre os casos analisados, pois requer a medição precisa das TWs que incidem no terminal monitorado em instantes muito próximos entre si. Entretanto, os demais cenários são igualmente importantes, pois em todos a segunda TW incide no ponto de medição antes mesmo que a primeira frente de onda tenha sua energia completamente dissipada. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 10, onde são ilustradas as TWs injetadas e medidas, cuja diferença é apresentada em forma de erro absoluto. Cabe ressaltar que, nesta análise, utilizou-se um arranjo de condutor com 7 voltas em torno do TC Bergoz, realizando-se o ajuste da  $RT$  para correta representação dos sinais de corrente de entrada em termos de amplitude nas saídas.

Analisando a Figura 10, nota-se que, nas primeiras frentes de onda, os erros em todos os casos avaliados se mantêm abaixo de 0,02 A, tomando a unidade de medição do sinal de entrada de corrente como referência. No entanto, quando da medição das TWs consecutivas, ou seja, da segunda frente de onda, verifica-se uma elevação das discrepâncias entre medições e frentes de onda injetadas, as quais tendem a reduzir com o aumento da separação no tempo das duas TWs consecutivas. Mesmo assim, em todos os cenários avaliados, as diferenças em amplitude dos sinais injetados e medidos permaneceram menores que 0,07 A, demonstrando a boa precisão do TC Bergoz mesmo quando da necessidade de medições de variações rápidas em janelas de tempo curtas nas correntes passantes na coluna capacitiva de medição. Tal desempenho demonstra a viabilidade de uso de medições na coluna capacitiva via TC Bergoz, usando o SEL-T400L como dispositivo registrador, o que permitiria ter a representação dos

transitórios de tensão no polo monitorado em sua forma “bruta”, viabilizando a aplicação de métodos modernos de LFTW que dependem da identificação de TWs refletidas e/ou transmitidas no ponto de falta.

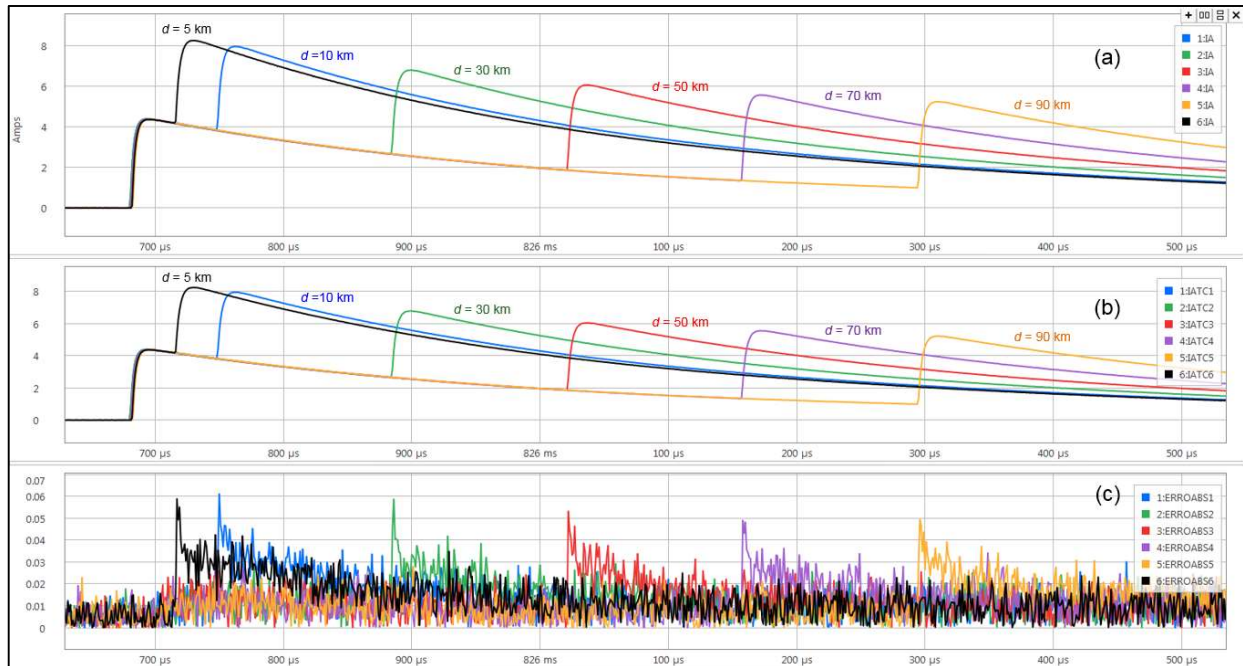


Figura 10 – Avaliação do TC Bergoz considerando medição de TWs consecutivas:

(a) Ondas injetadas; (b) Ondas medidas com RT ajustada ( $RT = 1428,57$ ); (c) Erro absoluto das medições.

#### 4.5 Teste de Playback via PSCAD para Simulação de *Trigger* de Gravação

Uma vez validado o desempenho do TC Bergoz como alternativa de baixo custo para sensoriamento destinado a funções de LFTW modernas, considera-se uma última etapa de análise para checagem do *trigger* do SEL-T400L aplicando-se sinais simulados a partir de um modelo detalhado da LT HVDC do Complexo do Madeira. O sistema simulado consistiu no modelo do PSCAD usado pela IE-Madeira para estudos de seu elo HVDC, incluindo detalhes da coluna capacitiva de medição e dos controles aplicados nas estações conversoras [2]. Vários casos foram simulados, mas por questões de limitação de espaço, apresenta-se aqui apenas o cenário mais crítico referente a uma situação de medição de TWs na SE ARA para uma falta polo-terra de  $0,1 \Omega$  a  $5$  km da SE CPV. Em decorrência da distância da falta, este é um dos piores cenários em termos de atenuação das TWs, o que poderia causar a dessensibilização do *trigger* de gravação do evento. O resultado obtido para este cenário é apresentado na Figura 11, onde ilustram-se a corrente na coluna capacitiva e a variável TWVDD usada como *trigger* do SEL-T400L.

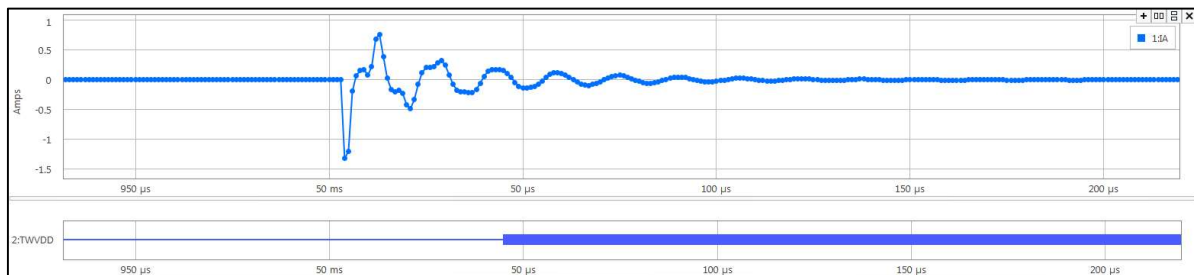


Figura 11 – Avaliação de sensibilidade de *trigger* para falta distante do ponto de medição.

Apesar das atenuações das TWs em virtude da distância do defeito, nota-se que a variável TWVDD foi sensibilizada apropriadamente, indicando que, neste cenário específico, haveria gravação da oscilografia do evento, viabilizando a aplicação das funções de LFTW vislumbradas. Ainda assim, é importante ressaltar que mesmo em uma situação de maior atenuação, em sendo um cenário previsto, maior número de voltas do condutor monitorado em volta do TC Bergoz poderiam ser consideradas, aumentando o ganho das medições para aumento da sensibilidade módulo registrador do SEL-T400L. Portanto, dos resultados apresentados, evidencia-se a viabilidade do uso do TC Bergoz como solução de baixo custo para aplicações modernas de LFTW, reduzindo sobremaneira os investimentos necessários para modernização dos esquemas de LFTW atualmente empregados no bipolo 1 da LT HVDC analisada.

#### 5.0 CONCLUSÕES



Neste trabalho, apresentou-se uma avaliação de desempenho de um esquema de sensoriamento de baixo custo para aplicações de LFTW na LT HVDC do Complexo do Madeira. Dos estudos, conclui-se que a solução poderia ser aplicada com sucesso no referido sistema, considerando detecções tanto das primeiras TWs incidentes nos terminais da LT mas também TWs refletidas e/ou refratadas no ponto de falta. Para fins de comprovação desta possibilidade, foram realizados estudos sobre a confiabilidade do esquema de sensoriamento de baixo custo para técnicas que dependem da detecção de TWs refletidas e/ou transmitidas no ponto de falta, sendo o esquema de medição baseado na aplicação de TCs em colunas capacitivas instaladas nos terminais do bipolo 1 da LT HVDC avaliada.

Dos resultados, demonstra-se que o TC testado é capaz de reproduzir com fidelidade as correntes transitórias passantes na coluna capacitiva, as quais reproduzem por consequência as componentes de alta frequência dos sinais de tensão nos polos. Esses sinais por sua vez, podem ser monitorados por dispositivos com taxa de amostragem compatível com aplicações de LFTW e que não apliquem filtros em suas entradas digitais além dos filtros *anti-aliasing* tradicionais. Ao longo das análises, considerou-se o TC Bergoz CTF0.1 e o relé SEL-T400L como dispositivo registrador de eventos e, a partir dos estudos, concluiu-se que a resposta do TC analisado torna viável a aplicação de funções de LFTW modernas, mesmo que dependam da identificação de TWs refletidas e transmitidas no ponto de falta, eliminando a necessidade de aquisição de novos sensores tradicionais para a LT HVDC avaliada.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KIMBARK, E. W. *Direct current transmission*. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. 1, 1971.
- [2] LUZ, G. S., JUNIOR, D. S. C. AND JUNIOR, S. G. "Hvdc transmission line modeling analysis in pscad and atp programs," em XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, 2014.
- [3] CAMPOS, P.; HONORATO, T.; SILVA, K.; LOPES, F. "Localização de Falhas em Linhas de Transmissão em HVDC Baseadas na Teoria de Ondas Viajantes," em SNPTEE, CIGRE Brasil, 2019.
- [4] ZHANG, Y., TAI, N. AND XU, B. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines. *IEEE Transactions em Power Delivery*, 27(3), pp.1583-1591, 2012.
- [5] BJORKLUND, H.; NORDTORP, N. "Next generation of line and cable fault locator for HVDC transmission," in CIGRE Meetings, 2018.
- [6] SAHA, M., IZYKOWSKI, J; ROSOLOWSKI, E. *Fault location on power networks*. Springer, 2009.
- [7] 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.
- [8] SEL-T400L Instruction Manual. 2018. Schweitzer Engineering Laboratories.

## 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 CIGRE, 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 de docentes 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.



TIAGO DA ROCHA HONORATO nasceu em Brasília, 1992. Recebeu o título de B.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB) em 2016 e M.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela UnB em 2020. Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Falhas e Automação de Testes em Relés de Proteção Microprocessados.



DIOGO TOTTI CUSTODIO nasceu em São Gonçalo do Sapucaí - MG, em 1982. Recebeu os títulos de B.Sc. e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) em 2005 e pela Universidade de Campinas (Unicamp) em 2009, respectivamente. Trabalhou na SIEMENS como Engenheiro de Proteção de Sistemas de Potência entre 2009 e 2014. No período de 2014 a 2019 trabalhou na Interligação Elétrica do Madeira S.A. como Engenheiro Especialista em Sistemas de Proteção e Controle HVDC e desde 2019 desempenha a função de Gerente de Engenharia nesta mesma empresa.



KLEBER MELO E SILVA recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2004, 2005 e 2009, respectivamente. Atualmente é Professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), editor associado da *IEEE Transactions on Power Delivery*, membro do Comitê de Estudos B5 (Proteção e Automação) do CIGRE e membro do Conselho de Assessoramento Científico (CAC) da FAPDF. De 2019 a 2020 foi professor visitante na Texas A&M University, Texas/US. Tem focado suas pesquisas principalmente nas áreas de proteção de sistemas elétricos de potência, localização de falhas e Transitórios Eletromagnéticos.