

**ANÁLISE DE ONDAS VIAJANTES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE INTERCONEXÃO DE FONTES INTERFACEADAS POR CONVERSORES: UM ESTUDO SOBRE APLICAÇÕES DE PROTEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS****Felipe V. Lopes (\*)**  
UFPB**Moisés J. B. B. Davi**  
USP**Mário Oleskovicz**  
USP**Kleber M. Silva**  
UnB**Roberto Dias**  
ESC Engenharia**Gustavo Salge**  
Conprove**Paulo Pereira Júnior**  
Conprove

## RESUMO

Apresenta-se neste trabalho uma análise de ondas viajantes medidas em linhas de transmissão que interconectam fontes interfaceadas por conversores. Para tanto, avaliam-se sistemas elétricos com fontes síncronas tradicionais e com fontes eólicas dos tipos III e IV, viabilizando estudos comparativos dos transitórios medidos. A partir das análises, demonstra-se a influência das terminações típicas deste tipo de sistema, com destaque para os efeitos das capacitâncias parasitas de barra e de transformadores. Por fim, delineiam-se conclusões sobre desafios e potencialidades de aplicações baseadas em ondas viajantes, a exemplo de funções de proteção de sobrecorrente e diferencial, bem como funções de localização de faltas.

## PALAVRAS-CHAVE

Fontes interfaceadas por conversores, localização de faltas, ondas viajantes, proteção de sistemas elétricos.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, um dos tópicos mais desafiadores na área de proteção de sistemas elétricos de potência tem sido a monitoração de linhas de transmissão (LTs) que interconectam fontes interfaceadas por conversores (FICs). Como exemplo, destacam-se as plantas fotovoltaicas e eólicas dos tipos III (*Doubly-Fed Induction Generator* – DFIG) e IV (*Full Converter* – FC), sendo os últimos dois tipos avaliados neste trabalho. No contexto da monitoração de LTs de interconexão de FICs, inserem-se as funcionalidades de proteção e localização de faltas, ambas indispensáveis para salvaguardar o sistema elétrico em situações de curto-circuito, bem como para acelerar a recomposição da LT após a ocorrência de faltas por meio do cálculo de estimativas do local do defeito. Entretanto, em virtude do comportamento atípico imposto pelos controles das FICs, funções de proteção e localização de faltas fásoriais têm apresentado problemas, sendo a literatura ainda carente de consenso quanto às melhores soluções para este tipo de sistema [1].

No contexto supracitado, funções de proteção e localização de faltas baseadas na teoria de ondas viajantes (aqui representadas pela sigla TW do termo em inglês *Traveling Waves*) têm atraído a atenção do setor elétrico do Brasil e de outros países. Tal fato se deve a essas funções serem baseadas em transitórios de falta, o que as torna robustas aos comportamentos atípicos da componente fundamental impostos pela atuação dos controles dos conversores das FICs [2]. Porém, é sabido que a rede de conexão das FICs resulta tradicionalmente em sistemas com vão único, culminando em terminações fracas no lado da FIC e com forte característica indutiva decorrente dos transformadores terminais [2],[3]. Essa característica pode interferir sobremaneira nos transitórios avaliados por algoritmos de proteção e localização de faltas baseados em TWs, visto que tendem a atenuar ondas de corrente, que são frequentemente empregadas neste tipo de aplicação.

Diante do exposto, reconhecendo-se que funcionalidades do tipo TW são promissoras para sistemas de interconexão de FICs, identifica-se a necessidade de estudos investigativos sobre o comportamento de TWs neste tipo de rede elétrica, avaliando-se as principais fontes de erro em funções de proteção e localização de faltas baseadas em TWs. Portanto, este trabalho é desenvolvido a partir de simulações de curtos-circuitos usando o programa PS Simul [4] (software para simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência), considerando modelos computacionais realísticos de FICs, a saber, fontes eólicas dos tipos III (DFIG) e IV (FC). Adicionalmente, apresentam-se análises considerando um modelo de fonte síncrona tradicional, viabilizando estudos comparativos dos transitórios de falta medidos nos terminais de uma LT de interconexão de FIC, e permitindo identificar possíveis influências das terminações sobre as funcionalidades TW de proteção de sobrecorrente (TW50) [3], de proteção diferencial (TW87) [5] e de localização de faltas, utilizando dados de dois terminais (DETWFL) [5]. A partir dos resultados apresentados, confirma-se que as funções TW podem ser promissoras, mas que também podem ser influenciadas pelas terminações do sistema, explicando as razões que fazem as capacitâncias parasitas de barra e de transformador figurarem como um aspecto decisivo para o desempenho das funções avaliadas.

(\*) Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), Universidade Federal da Paraíba (UFPB),  
Caixa Postal 5088, Campus I - Cidade Universitária CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil, E-mail: [felipelopes@cear.ufpb.br](mailto:felipelopes@cear.ufpb.br)

## 2.0 - PRINCÍPIOS TEÓRICOS PARA AVALIAÇÃO DE FUNCIONALIDADES TW NA CONEXÃO DE FIC

Na Figura 1, ilustra-se a topologia típica de conexão de FICs a sistemas elétricos interligados. Neste trabalho, consideram-se FICs eólicas dos tipos DFIG e FC, as quais são conectadas no terminal local (Terminal L), sendo a barra do lado do sistema interligado denominada de terminal remoto (Terminal R). Conforme apresentado, as FICs são conectadas por meio de uma rede coletora de distribuição, cujos ramais convergem para um transformador elevador (tipicamente YNd1 ou YNd11). Esse transformador é responsável por adaptar as tensões para níveis de sub-transmissão ou transmissão. No esquema da Figura 1, após a rede de sub-transmissão, a interface com o sistema de transmissão é realizada por meio de outro transformador elevador, que no Brasil é frequentemente do tipo YNyn0. Por meio desse transformador, as tensões são elevadas para o nível de transmissão das LTs, que por fim conectam as FICs à rede elétrica existente. Neste trabalho, o sistema teste foi modelado conforme reportado em [2], sendo a LT monitorada de 500 kV. Ademais, cenários de faltas internas e externas foram simulados, conforme indicado na Figura 1.

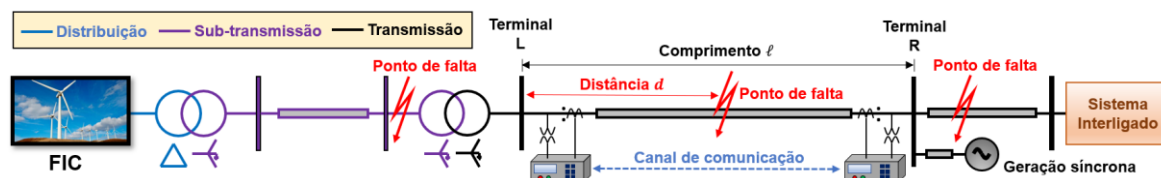


FIGURA 1 – Topologia típica de interconexão de FICs.

Apesar da grande atenção que tem sido dada aos efeitos dos controles dos conversores das FICs sobre o desempenho de funções de monitoração de LTs, a topologia de interconexão está diretamente relacionada com alguns comportamentos atípicos desse tipo de sistema em situações de curto-circuito [2]. Por exemplo, quando se trata do comportamento das TWs, nota-se que o terminal L é terminado por um transformador, sem que existam outros ramais de conexão de outros equipamentos. Como consequência, isso impõe uma forte característica indutiva na terminação, exceto pela existência de capacitâncias parasitas de barra  $C_{barra}$  e do próprio transformador, a saber, entre enrolamentos  $C_{trafo,HX}$ , entre enrolamento de baixa tensão e enrolamento de alta tensão e terra  $C_{trafo,H}$ , conforme ilustrado na Figura 2.

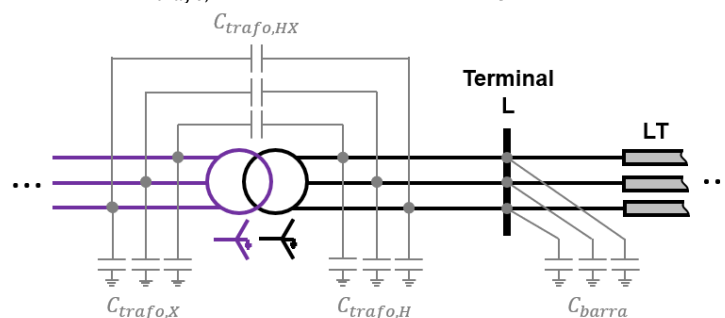


FIGURA 2 – Capacitâncias parasitas no terminal de conexão da FIC na LT avaliada.

### 2.1 Contribuições de Falta Atípicas e Transitórias para Diferentes Tipos de Geração

Quando se analisa uma FIC durante a ocorrência de curtos-circuitos, são várias as atipicidades verificadas em sua contribuição de falta, dentre as quais destacam-se: mudanças angulares nas grandezas de saída em virtude da atuação dos controles; redução relevante de correntes de sequência negativa; desvios de frequência em decorrência de problemas na operação dos *Phase-Locked Loop* (PLL); baixo nível de contribuição para a corrente de curto-circuito, entre outros [1]. Dentre esses, a baixa contribuição de curto-circuito é considerada por muitos um dos aspectos mais desafiadores, visto que impõe dificuldades para a sensibilização de funções de proteção, em especial, as proteções gradativas. Assim, quando da indisponibilidade de canais de comunicação para aplicação de proteções unitárias mais sensíveis, verificam-se dificuldades para ativação das proteções gradativas, o que pode inclusive originar zonas cegas sobre a LT nas proximidades do terminal da FIC [2].

Para ilustrar os aspectos supracitados, apresentam-se na Figura 3 registros simulados de uma falta monofásica aplicada no sistema da Figura 1, o qual é modelado com capacitâncias  $C_{barra}$ , considerando parâmetros reportados em [6]. Ao terminal L, conectam-se gerações dos tipos: gerador síncrono convencional, DFIG e FC, sendo todas modeladas considerando diretrizes reportadas em [7],[8]. Na figura, é possível observar aspectos transitórios peculiares a cada forma de geração durante os curtos-circuitos testados, nos quais consideram-se diferentes ângulos de incidência de falta  $\theta$ , a saber,  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ . Nas simulações, considerou-se uma referência senoidal, de modo que  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$  equivalem a faltas iniciadas no cruzamento da tensão por zero no ponto de defeito, ou no instante de sua passagem pelo pico positivo, respectivamente.

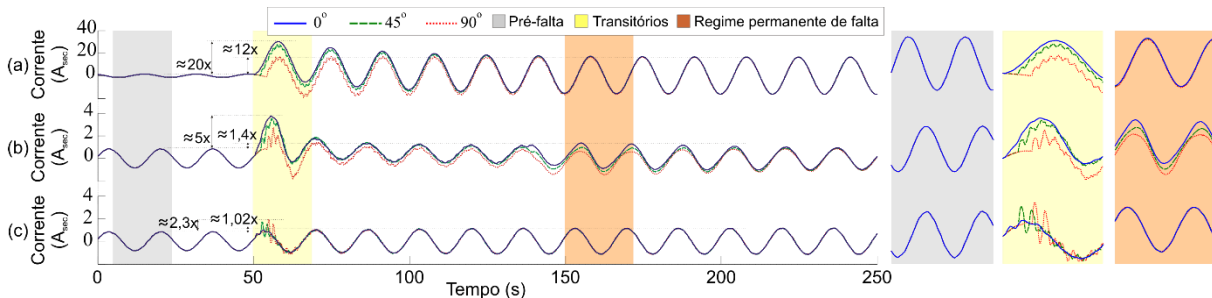


FIGURA 3 – Análise comparativa das contribuições de curto-circuito para diferentes ângulos de incidência: (a) Gerador síncrono convencional; (b) DFIG; (c) FC.

Do exposto, nota-se que os níveis das correntes de regime permanente de falta são independentes de  $\theta$ , conforme esperado, sendo significativamente maiores para o gerador síncrono convencional. Ainda, uma atipicidade transitória interessante consiste no comportamento da componente CC de decaimento exponencial, que é sobremaneira atenuada para os sistemas com DFIG e FC, mesmo em casos de  $\theta = 0^\circ$ , quando tal componente se mostra relevante para o sistema com gerador síncrono. Por outro lado, conforme destacado nas regiões ampliadas da Figura 3, os transitórios iniciais da falta variam significativamente com  $\theta$ , respeitando a teoria clássica de transitórios eletromagnéticos. Assim, transitórios de falta se mostram atenuados para  $\theta = 0^\circ$ , mas se mostram expressivos para  $\theta = 90^\circ$ . Tais características se mantêm válidas para os três tipos de geração avaliados, criando-se uma evidência de que as funcionalidades TW podem ser insensíveis às diferentes formas de geração de energia elétrica quando medidas na LT de interconexão da FIC. Nesse sentido, conforme destacado anteriormente, torna-se importante a avaliação dos efeitos das terminações da LT sobre o formato das TWs, incluindo análises quanto à influência de variações nas capacitâncias parasitas  $C_{barra}$ ,  $C_{trafo,HX}$ ,  $C_{trafo,X}$ , e  $C_{trafo,H}$  explicadas na Figura 2.

### 3.0 - INVESTIGAÇÃO DE FORMA DAS TWs NOS TERMINAIS DE LTs DE INTERCONEXÃO DE FICs

Com base nos aspectos apresentados, justifica-se o interesse na análise de transitórios de falta para fins de proteção e localização de defeitos em LTs de interconexão de FICs. Desse modo, é crucial entender fatores que possam influenciar na amplitude das TWs, tais como as características das terminações de LTs nesse tipo de sistema. De fato, em caso de faltas no lado da LT, a TW que incide no terminal L é medida como a sobreposição da TW incidente com a sua reflexão na barra. Portanto, os coeficientes de reflexão para ondas de corrente (TWI) e tensão (TWV) são determinantes, sendo dados por:

$$\Gamma_I = \frac{Z_s - Z_T}{Z_T + Z_s} \quad (1)$$

$$\Gamma_V = \frac{Z_T - Z_s}{Z_T + Z_s} \quad (2)$$

onde  $\Gamma_I$  e  $\Gamma_V$  são os coeficientes de reflexão para TWI e TWV, respectivamente, sendo  $Z_s$  a impedância de surto da LT monitorada e  $Z_T$  a impedância terminal no ponto de medição.

Analisando (1) e (2), nota-se que, ao considerar TWs como sendo variações de elevada frequência, a reatância indutiva do transformador terminal tende a uma terminação em aberto [2],[6],[9]. Com isso, fazendo  $Z_T \rightarrow \infty$ , (1) e (2) resultam em -1 e +1, respectivamente, significando que TWIs são refletidas com polaridade oposta e TWVs com mesma polaridade em relação às TWs incidentes. Assim, ocorre uma atenuação nas TWIs medidas, enquanto que as TWVs são amplificadas nas medições. Adicionalmente, ao considerar as capacitâncias parasitas descritas na Figura 2, tais comportamentos podem ser alterados, de modo a diminuir o nível de atenuação de TWIs, bem como o nível de amplificação das TWVs, conforme reportado em [6].

É importante salientar que, em casos de faltas a montante do terminal L no lado de baixa tensão do transformador (ver Figura 1), os mesmos efeitos de atenuação e amplificação são verificados nas TWs. Entretanto, em virtude do menor nível de tensão, as ondas apresentam menor amplitude [3], passando para o lado da LT majoritariamente por meio das capacitâncias parasitas do transformador (ver Figura 2). Neste caso, é natural se pensar que apenas a capacitância entre enrolamentos  $C_{trafo,HX}$  seria determinante para a propagação da TW do lado de baixa tensão do transformador para o lado de alta tensão na LT. Porém, as capacitâncias parasitas se combinam, sendo a capacitância equivalente resultante a variável que de fato determinará a amplitude da TW que adentrará na LT monitorada. Mesmo assim, ao considerar a baixa amplitude das TWs geradas para faltas no lado de baixa tensão do transformador e assumindo que os valores das capacitâncias parasitas são tipicamente baixos, espera-se que as TWs que passam pelo transformador chegando à LT apresentem baixa amplitude em comparação às TWs verificadas em cenários de falta na LT ou no sistema interligado adjacente [3].

### 3.1 Comparação de Sinais Modais Com e Sem Filtragem TW para Gerações DFIG e FC

Para demonstrar que as TWs não são afetadas pela forma de geração, simulam-se casos de faltas no sistema ilustrado na Figura 1 usando o software PS Simul. Foram consideradas faltas AT e AB na LT monitorada, bem como faltas externas a montante e a jusante da linha. Para faltas internas, distâncias de 20, 60 e 100 km em uma LT com comprimento  $\ell = 120$  km foram simuladas, tomando o terminal L como referência. Nos estudos, variou-se a resistência de falta com valores de  $0,1 \Omega$  e  $50 \Omega$  para as faltas AT, e de  $0,1 \Omega$  e  $1 \Omega$  para as faltas AB. As capacitâncias parasitas, por sua vez, foram variadas nos terminais L e R, considerando:  $C_{barra} = [5; 15; 50]$  nF,  $C_{trafo,HX} = [1; 2; 3]$  nF,  $C_{trafo,X} = [4; 8; 10]$  nF, e  $C_{trafo,H} = [3; 6; 9]$  nF. Com isso, um total de 60 casos para cada tipo de geração (DFIG e FC) foi gerado, sendo a transformada de Clarke aplicada aos sinais obtidos para viabilizar o estudo de TWs desacopladas (conforme no relé real descrito em [5]). Portanto, como resultado, têm-se os modos zero, alfa e beta das medições de corrente, representados por  $i_0$ ,  $i_1$  e  $i_2$ , respectivamente.

Em uma primeira análise, têm-se os diagramas de dispersão, os quais se baseiam na avaliação da posição de coordenadas cartesianas sobre um plano gráfico, cujos pontos são definidos pela combinação de amostras das grandezas comparadas. Neste trabalho, sinais modais e sinais do tipo TW modais para gerações DFIG e FC são avaliados, sendo os últimos obtidos a partir do filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS) [5]. Esse filtro responde a transitórios em degrau com saídas em forma triangular [5]. Por outro lado, em casos de TWs atenuadas, transitórios em forma de rampa são verificados, de modo que o filtro DS responde com saídas em forma de parábola [5]. Em ambos os casos, a detecção do pico do triângulo ou da parábola é tomada como procedimento para identificação do instante de incidência da TW, em cuja amostra também se afere a amplitude da TW.

Na Figura 4, apresentam-se os diagramas de dispersão obtidos, sendo TWIL0, TWIL1 e TWIL2 os sinais dos modos zero, alfa e beta filtrados via filtro DS, considerando medições no terminal L (lado da FIC). Deve-se atentar que, quando as grandezas apresentam similaridade, os pontos se aloca sobre uma “reta de coincidência”. Caso contrário, são verificadas regiões de alargamento no entorno da reta. Adicionalmente, com o objetivo de comparar as formas de onda obtidas para gerações dos tipos DFIG e FC, apresentam-se na Figura 5 sinais TW modais obtidos por meio do filtro DS, quando considerados casos pontuais de uma falta AT (para ilustrar as TWIL0s e TWIL1s) e de uma falta AB (para ilustrar as TWIL2s).

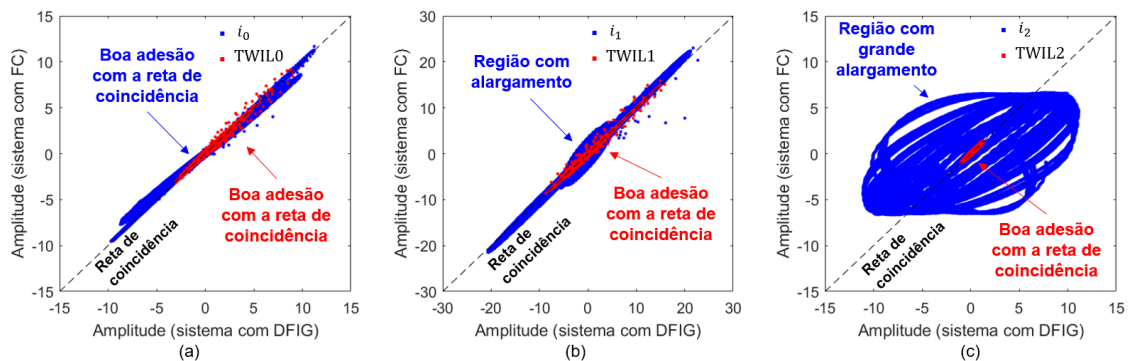


FIGURA 4 – Diagramas de dispersão considerando simulações em massa com gerações dos tipos DFIG e FC e análise de sinais modais: (a) TWIL0; (b) TWIL1; (c) TWIL2.

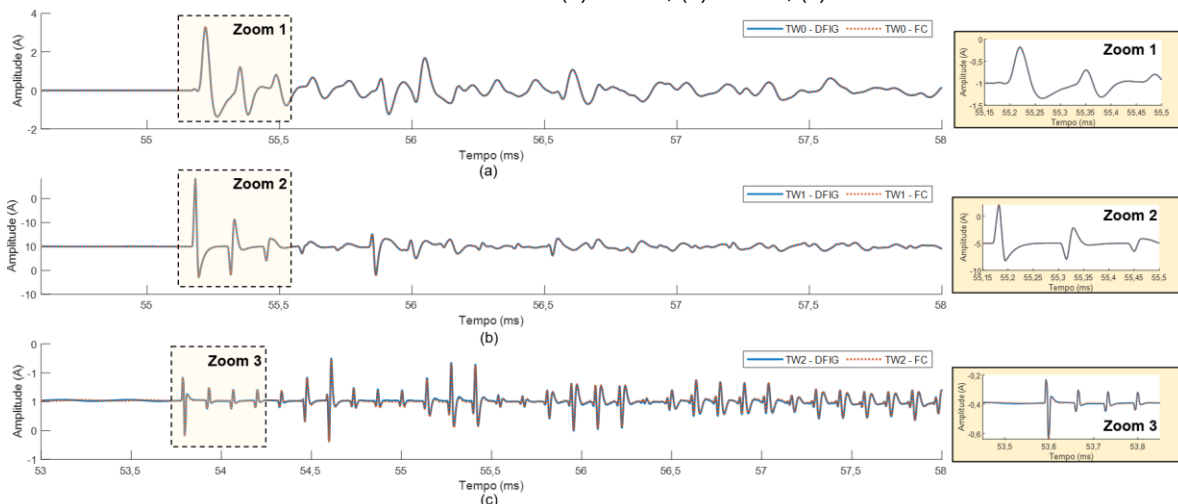


FIGURA 5 – Comparação de TWs com gerações dos tipos DFIG e FC: (a) TWIL0; (b) TWIL1; (c) TWIL2.

Do acordo com a Figura 4, antes da filtragem TW (pontos em azul), nota-se que  $i_0$  tem boa adesão com a “reta de coincidência”, mas  $i_1$  e  $i_2$  apresentam regiões de alargamento que comprovam a existência de discrepâncias entre as amostras dos sinais obtidos quando da aplicação das gerações DFIG e FC. Por outro lado, após a filtragem TW (pontos em vermelho), todos os modos apresentam boa adesão à “reta de coincidência”, indicando que o comportamento das TWs não é afetado de forma significativa pelo tipo de geração do sistema. Tal conclusão é comprovada na Figura 5, onde fica evidente que os sinais das TWs são semelhantes, mesmo alterando o tipo de geração. Ainda assim, é perceptível que as saídas do filtro TW empregado não consistem exatamente nas respostas triangulares ou parabólicas esperadas idealmente, o que se justifica pelas distorções impostas pela terminação de conexão da FIC, tal como será abordado nas próximas seções.

### 3.2 Avaliação da Influência de Capacitâncias Parasitas de Transformadores e Barramentos

Apresenta-se nesta seção uma análise sobre a influência das capacitâncias parasitas descritas na Figura 2 sobre o comportamento dos sinais utilizados para extração de informações de instante de incidência e amplitude das TWs (aqui considerados como sendo os sinais de saída do filtro DS). Da literatura, sabe-se que os Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) possuem respostas em frequência que podem dificultar a análise de TWs, muito embora as primeiras frentes de onda incidentes sejam consideradas mensuráveis em termos de instante de incidência e polaridade. Assim, apesar de existirem sistemas de localização de faltas baseados em TWs de tensão, neste trabalho, consideram-se análises apenas de TWIs, visto que são amplamente empregadas tanto em esquemas de localização de faltas como em sistemas de proteção.

Na Figura 6, apresentam-se os sinais das TWIL1, que representam os modos aéreos nos terminais L e R. Na figura, demonstram-se resultados obtidos de faltas no centro da LT monitorada e faltas externas no lado de baixa tensão do transformador de conexão da FIC. Para esses casos, consideram-se diferentes combinações das capacitâncias parasitas, usando:  $C_{barra} = [5; 15; 50]$  nF,  $C_{trafo,HX} = [1; 2; 3]$  nF,  $C_{trafo,X} = [4; 8; 10]$  nF, e  $C_{trafo,H} = [3; 6; 9]$  nF. Ao todo, 24 casos são simulados, sendo os casos de 1 a 12 referentes às faltas internas, e os casos de 13 a 24 referentes às faltas externas.

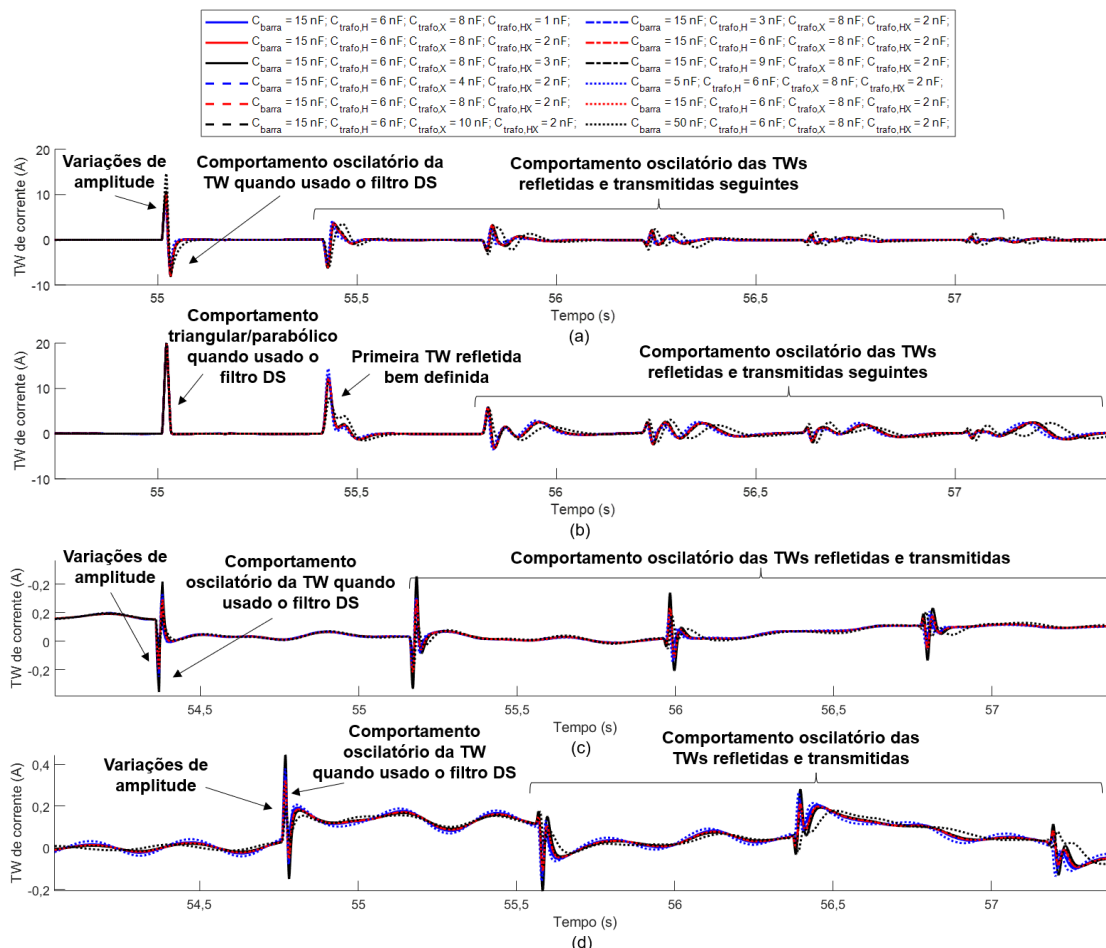


FIGURA 6 – TWs filtradas variando as capacitâncias parasitas: (a) TWIL1 e (b) TWIR1 para faltas internas; (c) TWIL1 e (d) TWIR1 para faltas externas.

De acordo com os resultados ilustrados na Figura 6, para faltas internas, nota-se que as combinações das capacitâncias parasitas juntamente com a reatância do transformador de conexão da FIC resultam em variações de amplitude e oscilações nos sinais filtrados medidos no terminal L. Entretanto, tais variações são menos evidentes no terminal R, que, por possuir vãos de LT conectados, resulta em sinais TWIL1 melhor estabelecidos, ou seja, sem oscilações críticas. Ainda, vê-se na Figura 6 que a primeira TW refletida medida no terminal R é nítida, enquanto que no terminal L todas as TWs refletidas/transmitidas apresentam oscilações que podem prejudicar algoritmos que dependam da detecção de reflexões ao longo do sistema. Apesar disso, no terminal R, após as primeiras TWs incidentes, as combinações das capacitâncias parasitas passam a influenciar o formato dos sinais TW. Isso ocorre apenas após um determinado tempo, quando reflexões distorcidas provenientes do terminal L incidem no terminal R, misturando os sinais estáveis e oscilatórios das TWs.

Ainda em relação à Figura 6, quando consideradas faltas externas no lado de baixa tensão do transformador de conexão da FIC, nota-se que as medições das TWs apresentam baixa amplitude e oscilações em ambos os terminais L e R. Isso se deve ao fato das TWs passarem todas pelo transformador de conexão, sendo as capacitâncias parasitas o principal caminho de propagação. Com isso, as TWs medidas apresentam amplitudes significativamente menores do que as verificadas para casos de faltas na LT ou no sistema interligado adjacente, fato este que torna possível distinguir curtos-circuitos ocorridos no lado de baixa tensão do transformador ou no lado de alta tensão, conforme reportado em [3].

#### 4.0 - AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PROTEÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADAS EM TW

##### 4.1 Função de Proteção de Sobrecorrente TW (TW50)

A função TW50 se baseia na condição de amplitude que se manifesta nas TWs de corrente em casos de faltas no lado de baixa tensão do transformador terminal da LT (TWs medidas na LT com baixa amplitude) e no lado de alta tensão (TWs medidas na LT com amplitude elevada). Desse modo, em [3], propõe-se um limiar de pick-up (TW50P) para distinção entre tais cenários de falta, sendo o ajuste TW50P dado pela equação (3), onde  $\delta$  é um coeficiente de fração de TW que passa do lado de baixa tensão para o lado de alta tensão do transformador (segundo [3], entre 0,05 e 0,1),  $V_{nom,L}$  é a tensão de linha nominal do sistema,  $Z_{s,min,X}$  é a menor impedância de surto dentre as LTs conectadas no lado de baixa tensão (podendo-se assumir  $\approx 350 \Omega$  para LTs aéreas e  $\approx 70 \Omega$  para LTs subterrâneas) e  $k$  é uma margem de segurança (segundo [3], entre 1,5 e 2):

$$TW50P = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \delta \cdot \frac{V_{nom,L}}{Z_{s,min,X}} \cdot k \quad (3)$$

Aplicando (3) ao sistema simulado, onde são usadas LTs aéreas e um Transformador de Corrente (TC) com relação de transformação de 80, sendo  $V_{nom,L} = 500 \text{ kV}$ , ao adotar os dois valores de  $\delta$  sugeridos em [3] e um ajuste  $k$  conservador de 2, são obtidos dois limiares, a saber:  $2,916 \text{ A}_{sec}$  e  $5,832 \text{ A}_{sec}$ . Apesar da TW50 ser proposta para uso no terminal R, neste trabalho, os resultados são avaliados considerando sua aplicação nos terminais L e R, visando vislumbrar limitações e potencialidades para cada caso. Na Figura 7, analisam-se as amplitudes das primeiras TWIL1s incidentes nos terminais da LT monitorada conjuntamente com os limiares calculados. Faltas AT com baixa resistência ( $0,1 \Omega$ ) aplicadas no centro da LT monitorada são estudadas. As mesmas combinações de capacitâncias parasitas usadas na Figura 6 são consideradas.

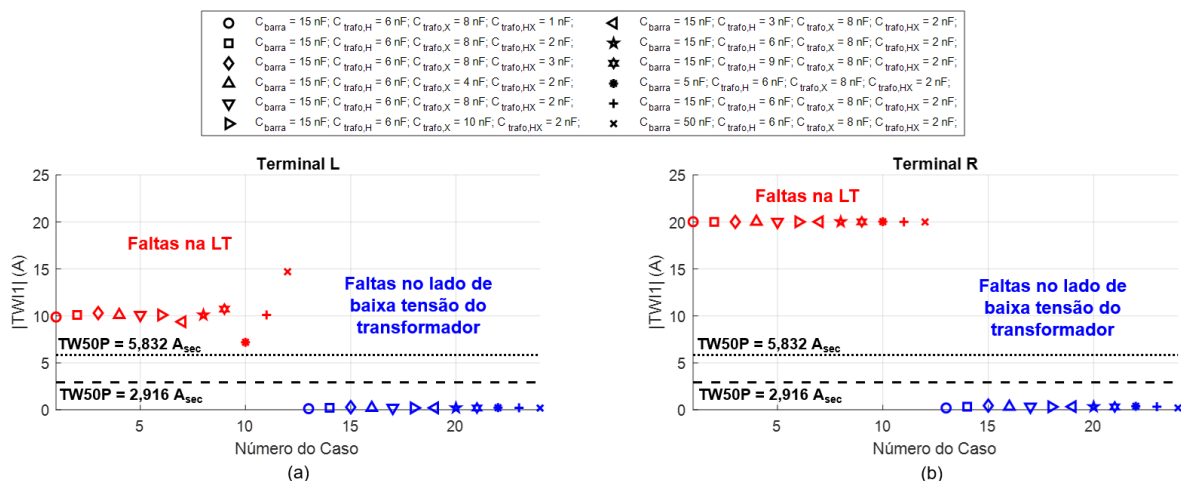


FIGURA 7 – Amplitudes das TWs variando as capacitâncias parasitas para faltas internas e externas: (a) |TWIL1|; e (b) |TWIR1|.

A partir dos resultados obtidos, nota-se que os limiares calculados são confiáveis e úteis para procedimentos de distinção entre faltas no lado da LT monitorada e faltas no lado de baixa tensão do transformador de conexão da FIC. Tal performance é verificada em ambos os terminais L e R (ver Figura 7). Entretanto, conforme reportado em [3], a TW50 se mostra mais confiável no terminal R, visto que as amplitudes das TWI1s para faltas na LT são maiores e mais estáveis. No terminal L, apesar de resultados satisfatórios terem sido obtidos, percebe-se que em alguns cenários, a depender da combinação das capacitâncias parasitas, as amplitudes das TWI1s se aproximam dos limiares TW50P, podendo, em algum caso, resultar em problema de sensibilidade. Por isso, os proponentes da TW50 sugerem sua utilização no terminal da rede, ou seja, terminal R, contando com elementos direcionais para distinção entre faltas na LT e faltas externas no lado do sistema interligado.

#### 4.2 Função de Proteção Diferencial TW (TW87)

Para facilitar a explicação da função TW87, apresenta-se na Figura 8 um diagrama de Bewley, onde são ilustrados cenários de faltas internas e externas a uma dada LT monitorada. Na figura, demonstra-se que existe um padrão bem definido para TWs que entram e saem da LT, especialmente no que se refere às polaridades, amplitudes e tempos de propagação. Com isso, na TW87, calculam-se grandezas de operação (IDIF) e restrição (IRST) que permitem distinguir faltas internas de faltas externas à LT [5]. IDIF e IRST são calculados usando:

$$IDIF = |TWI1R(t) + TWI1L(t - P)|, \quad (4)$$

$$IRST = \max(|TWI1R(t) - TWI1L(t - \tau)|, |TWI1R(t - \tau) - TWI1L(t)|), \quad (5)$$

onde  $P$  é a diferença de tempo entre as primeiras TWs incidentes nos terminais L e R, e  $\tau$  é o tempo de trânsito da LT, que pode ser estimado matematicamente usando  $\tau = \ell/v_p$ , sendo  $\ell$  e  $v_p$  o comprimento da LT e a velocidade de propagação do modo aéreo, respectivamente.

Traduzindo (4) e (5) para termos práticos, pode-se dizer que a variável IDIF é calculada a partir da soma das amplitudes obtidas para as primeiras TWs incidentes nos terminais da LT monitorada. Por outro lado, IRST é obtida a partir da diferença entre a primeira TW incidente em um dado terminal e a TW que sai no terminal oposto após um período  $\tau$ . Desse modo, cria-se uma janela de busca no entorno do local esperado para as TWs de saída, adotando-se uma margem de segurança capaz de acomodar imprecisões no ajuste  $\tau$ . Assim, conforme ilustrado na Figura 8, para faltas externas,  $P \approx \tau$ , e as primeiras TWI1s incidentes nos terminais L e R apresentam polaridades inversas com amplitudes em módulo parecidas. Portanto, adotando amplitudes hipotéticas  $+A_m$  e  $-A_m$  nos terminais L e R, respectivamente, e assumindo que a TW de saída vista pelo terminal mais distante da falta coincide com a TW incidente no terminal de observação, tem-se que  $IDIF = | +A_m + (-A_m) | \approx 0$ , enquanto que  $IRST = | +A_m - (-A_m) | \approx 2A_m$ . Neste caso, a função TW87 identificaria falta externa. Por outro lado, para uma falta interna, sabe-se que  $P < \tau$ , e que as TWI1s incidentes apresentam mesma polaridade com amplitudes relativamente parecidas em módulo. Assim, tem-se  $IDIF = | +A_m + A_m | \approx 2A_m$  e  $IRST = | +0 - A_m | \approx A_m$ , caracterizando uma situação de falta interna, que culminaria na sensibilização da condição diferencial do esquema de proteção TW87. Nesse contexto, é importante ressaltar que, além da condição diferencial, na TW87, existem também as seguintes condições de operação: amplitudes das TWI1L e TWI1R; localização de faltas por meio de algoritmo de dois terminais; polaridades das TWI1s para verificação de faltas em circuitos paralelos; e ainda, condições de sobrecorrente, que são supervisionadas por elementos baseados em grandezas incrementais [5]. Apesar dessas características, neste trabalho, apenas as condições exclusivamente baseadas em TWs para LTs de circuito simples são avaliadas.

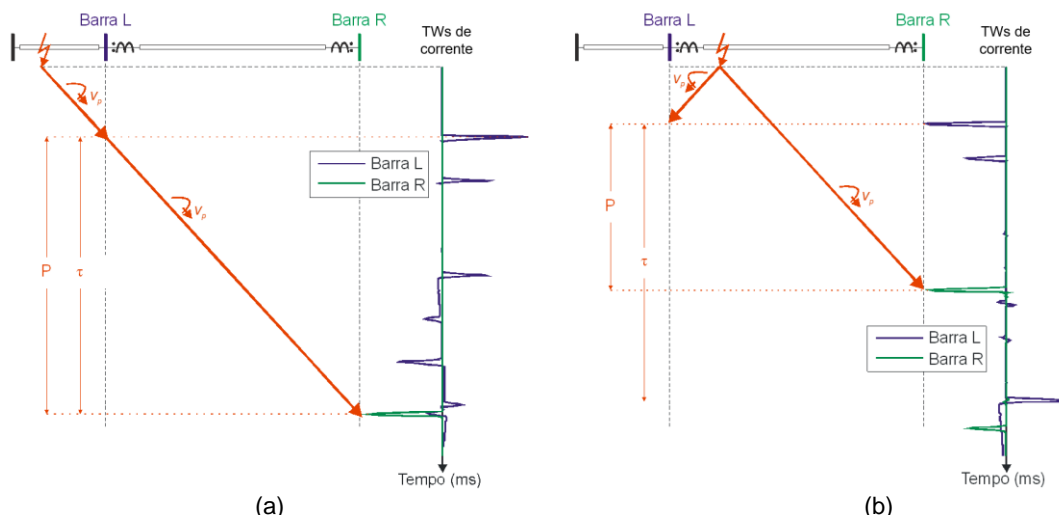


FIGURA 8 – TWs medidas nas barras L e R: (a) Falta externa; e (b) Falta interna.

Para facilitar as análises de interesse, as condições de operação da função TW87 serão denominadas de: Condição 1) Análise de amplitudes das TW1s nos terminais L e R, ou seja, IL e IR; Condição 2) Local de falta estimado  $m_{87}$ , dado em pu, que deve atender ao critério  $0 + \Delta d < m_{87} < 1 - \Delta d$ , sendo  $\Delta d$  uma margem de segurança usada no entorno dos terminais da LT, sendo aqui adotado  $\Delta d = 0,02$ ; e Condição 3) Critério de sensibilização diferencial, considerando grandezas de operação e restrição, de modo que  $IDIF > SLP \cdot IRST$  para curtos-circuitos internos, sendo SLP um ajuste de slope aplicado, aqui adotado como 0,5.

Visando a análise das condições supracitadas, o mesmo conjunto de cenários adotados na Figura 4 são empregados, ou seja,  $C_{barra} = [5; 15; 50]$  nF,  $C_{trafo,HX} = [1; 2; 3]$  nF,  $C_{trafo,X} = [4; 8; 10]$  nF, e  $C_{trafo,H} = [3; 6; 9]$  nF. Nesses casos, contemplam-se faltas externas a montante do transformador (na bucha de conexão no lado de baixa tensão), faltas externas a jusante da LT monitorada (a 14,7 km do terminal R), bem como faltas internas à LT monitorada (a 20, 60 e 100 km da barra L, sendo  $\ell=120$  km). Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 9, cujas legendas indicam as situações de faltas internas e externas.

A Condição 1 de operação da TW87 pode ser analisada por meio das Figuras 9(a) e (b). Para essas condições, considerou-se o limiar mais sensível obtido para a função TW50, ou seja,  $2,916 A_{sec}$ . Do exposto, percebe-se que no terminal R, IR apresenta valores maiores e menores que o limiar para todos os casos de faltas internas e externas, respectivamente. Por outro lado, no terminal L, em virtude da terminação fortemente indutiva, a variação das capacitâncias parasitas resulta em amplitudes com comportamento menos estável, chegando a perder sensibilidade em alguns poucos casos. Ainda assim, é importante destacar que em nenhuma situação houve perda de segurança, visto que IL e IR foram menores que o limiar em todos os cenários de faltas externas.

Para avaliar a Condição 2 da TW87, utiliza-se a Figura 9(c). Na figura, demonstra-se que todas as localizações estimadas em pu ( $m_{87}$ ) para faltas internas apresentaram valores entre os limiares aplicados, ficando as estimativas para faltas externas fora dos limites de operação. Com isso, ainda sem compromisso de avaliação da precisão da localização de faltas, é suficiente concluir que a variável  $m_{87}$  se mostrou estável, apresentando comportamento condizente com o esperado para os casos testados.

Por fim, a avaliação da Condição 3 da TW87 é realizada por meio das Figuras 9(d) e (e). Da análise dos resultados, demonstra-se que para todos os casos de faltas internas, seja utilizando DFIG ou FC, IDIF foi maior do que  $SLP \cdot IRST$ . Por outro lado, para todos os casos de faltas externas, tal condição foi contrária, sendo IDIF menor que  $SLP \cdot IRST$ . Ressalta-se ainda que, como condição adicional, avalia-se o valor de IDIF em relação a um limiar, que aqui foi adotado como sendo o dobro do empregado para a Condição 1 da TW87. Assim, ajustando o limiar em aproximadamente  $6 A_{sec}$ , nota-se que IDIF foi maior que o limiar para todas as faltas internas à LT, e menor que o limiar para todas as faltas externas, conferindo confiabilidade e segurança à função TW87.

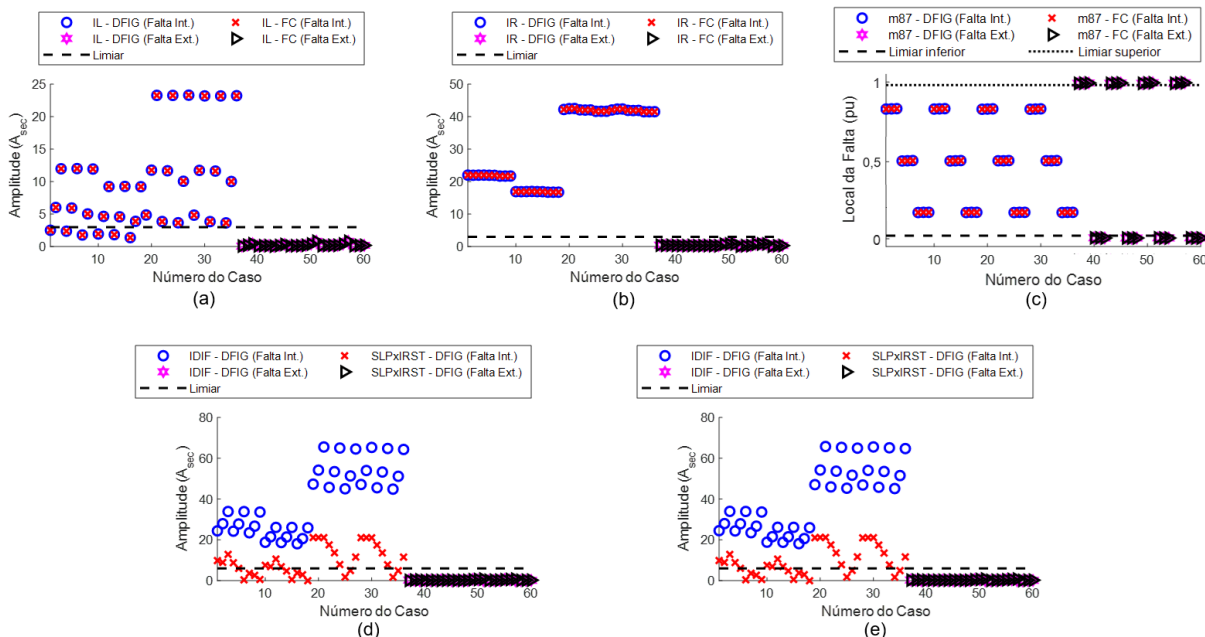


FIGURA 9 – Análise de desempenho da TW87 condizendo condições unicamente baseadas em TW:  
(a) Análise de amplitude de IL; (b) Análise de amplitude de IR;  
(c) Análise localização de falta estimada  $m_{87}$ ; (d) Análise da condição diferencial  $IDIF > SLP \cdot IRST$  no terminal L;  
(e) Análise da condição diferencial  $IDIF > SLP \cdot IRST$  no terminal R.



Das análises apresentadas, pode-se concluir que a operação da função TW87 (considerando apenas as condições unicamente baseadas em TW) se mostrou de fato atrativa, visto que apresentou perda de sensibilidade apenas em poucos casos de faltas internas, mas sem perda de segurança para as faltas externas simuladas. Estes casos têm relação principalmente com cenários de baixa capacitância parasita de barra, o que resulta em uma maior atenuação das TWs medidas no terminal local. Obviamente, é perceptível que tais resultados são fruto dos limiares empregados, de modo que os autores reconhecem que outros ajustes poderiam alterar o desempenho da função. Entretanto, os resultados são esclarecedores no que se refere aos efeitos das capacitâncias parasitas, evidenciando que, apesar do bom desempenho apresentado pelas funções TW50 e TW87, as capacitâncias parasitas figuram como fatores determinantes para o ajuste de sensibilidade das proteções.

#### 4.3 Função de Localização de Faltas Usando Dados de Dois Terminais (DETWFL)

Como última análise deste trabalho, apresenta-se uma avaliação da precisão da técnica clássica de localização de faltas DETWFL. Esse método requer sincronização de dados e ajustes da velocidade de propagação do modo aéreo  $v_{p1}$ , a qual foi ajustada a partir dos parâmetros da LT monitorada, resultando 98,4925% da velocidade luz. A fórmula para estimação da distância de falta é dada por:

$$\tilde{d} = 0,5 \cdot [\ell - (t_R - t_L) \cdot v_{p1}], \quad (6)$$

onde  $t_L$  e  $t_R$  são os instantes de incidência das primeiras TWs incidentes nos terminais L e R, respectivamente.

Uma vez que as TWs refletidas se mostraram instáveis nas análises realizadas por meio da Figura 6, algoritmos de um terminal não são aqui avaliados, ficando a proposta de estudo para trabalhos futuros. Portanto, na Figura 10, ilustram-se os erros absolutos obtidos das estimativas calculadas para os mesmos casos de faltas internas considerados na seção anterior. Do exposto, nota-se que os erros não excedem a ordem de 850 m, o que é equivalente a aproximadamente três vãos de torre típicos ( $\approx 300$  m cada). Tal resultado revela que, de fato, o método DETWFL não é afetado de maneira crítica pelas diferentes formas de geração avaliadas (DFIG e FC), sendo promissor para sistemas de interconexão de FICs.

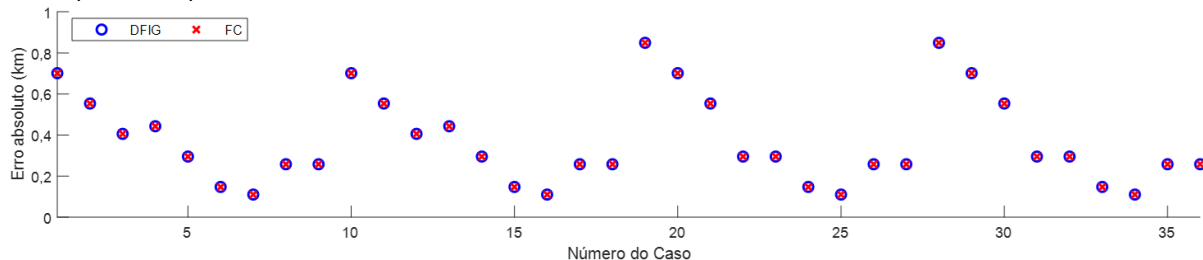


FIGURA 10 – Avaliação da precisão do método de localização de faltas DWTFLL.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se um estudo sobre o desempenho de técnicas de proteção e localização de faltas baseadas na teoria de TWs, quando aplicadas em LTs de interconexão de FICs. Na primeira parte do estudo, foram demonstradas distorções causadas sobre os sinais filtrados das TWs em virtude da terminação fortemente indutiva decorrente do transformador de conexão da FIC, explicando-se os efeitos e importância das capacitâncias de barra e de transformador neste tipo de sistema. Na sequência, analisaram-se as funções de sobrecorrente TW (TW50) e diferencial TW (TW87), visando avaliá-las em termos de confiabilidade e segurança. Para tanto, foi simulada uma variedade de casos utilizando o software PS Simul, incluindo cenários de faltas internas e externas a uma LT.

Dos resultados obtidos, conclui-se que as funções TW50 e TW87 são de fato promissoras, pois são imunes às atipicidades impostas pelos controles das FICs sobre a componente fundamental do sistema. Entretanto, apesar de tal potencialidade, destaca-se a influência das capacitâncias parasitas de barra e de transformador, as quais são determinantes para o desempenho das referidas funções, especialmente quanto à sensibilidade para faltas internas. De fato, dos estudos realizados, não foram identificados problemas de perda de segurança, fato este que corrobora com a premissa de evitar atuações indevidas em casos de faltas fora do elemento protegido, conforme reportado por desenvolvedores de funcionalidades TW. Com isso, propõe-se, para trabalhos futuros, estudos de sensibilidade paramétrica dos ajustes empregados nas funções TW50 e TW87, incluindo avaliações de elementos direcionais baseados em TW, bem como desenvolvimentos que possam reduzir os impactos das distorções e atenuações causadas pelo transformador de conexão das FICs sobre os sinais filtrados das TWs.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Nagpal, M. Jensen, M. Higginson. Protection Challenges and Practices for Interconnecting Inverter Based Resources to Utility Transmission Systems. IEEE Power Energy Soc, p. 1-65, 2020.
- [2] F. V. Lopes, M. Davi, K. Silva, R. Filho, A. Neto, R. Reis, T. Honorato, P Pereira Jr., M. Oleskovicz, F. Vasquez, "From Hertz to Megahertz: Lessons Learned About the Impact of Inverter-Based Wind Turbine Generators on the Protection of Interconnecting Lines," in CIGRE Paris Session, 1-11, 2022.
- [3] B. Kasztenny, V. Mynam, S. Marx, R. Barone, "Traveling-Wave Overcurrent—A New Way to Protect Lines Terminated on Transformers", in 48<sup>th</sup> Annual Western Protective Relay Conference, 2021.
- [4] Conprove Engenharia. PS-SIMUL: Software para Modelagem do Sistema de Potência e Simulação de Transitórios Eletromagnéticos, 2019. [Online]: <https://conprove.com/produto/08-ps-simul-software-para-modelagem-do-sistema-de-potencia-e-simulacao-de-transitorios-eletromagneticos>.
- [5] SEL-T401L Ultra-High-Speed Line Relay Instruction Manual, 2022. Available: selinc.com.
- [6] F. Lopes, J. Costa, T. Honorato, R. Toledo, L. Gama, P. Junior, G. Salge, M. Davi, "Busbar Capacitance Modeling Effects During Relay Testing Procedures for Transmission Lines Interconnecting Wind Power Plants." In Journal of Control, Automation and Electrical Systems, pp. 1-9, 2021.
- [7] R. Gagnon, G. Turmel, C. Larose, J. Brochu, G. Sybille, M. Fecteau, "Large-scale real-time simulation of wind power plants into Hydro-Québec power system," in Intern. Workshop on Large-scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Plants, Oct. 2010.
- [8] O. Tremblay, R. Gagnon, M. Fecteau, "Real-time simulation of a fully detailed type-IV wind turbine," in Proceedings of the International Power Systems Transients Conference (IPST), vol. 13, pp. 18-20, July 2013.
- [9] A. Greenwood. *Electrical transients in power systems*. 2<sup>nd</sup> edition, 1991.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Felipe V. Lopes** nasceu em Campina Grande-PB, 1985. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc, D.Sc. e pós-doutor no domínio da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2009, 2011, 2014 e 2018, respectivamente. É Senior Member do IEEE e membro do Comitê de Estudos B5 do CIGRE, onde atua como secretário do grupo de trabalho B5.55 internacional e como coordenador do grupo de trabalho nacional GT-02, ambos voltados para estudos de tecnologias baseadas em ondas viajantes. Atualmente é professor da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e bolsista de produtividade em pesquisa CNPq Nível 2, atuando em pesquisas nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos, Localização de Falhas e Transitórios Eletromagnéticos.



**Moisés J. B. B. Davi** concluiu sua graduação em Engenharia Elétrica (2014) e mestrado em Inovação Tecnológica (2021) pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Com título de especialista em Automação (2018) pela Universidade Cândido Mendes, e em Engenharia de Qualidade (2019) pela Faculdade Única de Ipatinga, possui 5 anos de experiência na área de proteção de sistemas elétricos, comissionamento de IEDs, simulação/análise de transitórios eletromagnéticos e análise de oscilografia. Atualmente é doutorando na Universidade de São Paulo (EESC-USP), com pesquisas na área de proteção de sistemas com gerações renováveis baseadas em conversores.



**Mário Oleskovicz** concluiu sua graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 1995. Obteve seus títulos de Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), Brasil, em 1997 e 2001, respectivamente. Atualmente é Professor Assistente no Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP). Trabalha em pesquisas e projetos com foco em sistemas de energia (geração, transmissão, distribuição e microrredes), qualidade de energia e proteção digital.



**Kleber M. Silva** nasceu em João Pessoa, 1980. Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. no domínio da Engenharia Elétrica pela UFCG em 2004, 2005 e 2009, respectivamente. Atualmente é Professor Associado 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 Cigré 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 experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Falhas e Transitórios Eletromagnéticos.



**Roberto Feliciano Dias Filho**, Engenheiro Eletricista (2003/UPE), MSc (2009/UFPE), DSc (2015/UFPE). É professor adjunto do curso de Engenharia Elétrica da UPE desde 2013, e trabalha na ESC Engenharia desde 2019 na coordenação das atividades de inovação. Trabalhou na ANDESA (2004-2006) e na CHESF (2006-2018) na elaboração de estudos elétricos de regime permanente, de graduação da proteção, de estabilidade e de transitórios eletromagnéticos com foco na expansão do sistema elétrico nordestino.



**Gustavo Salge** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), concluída em 2008. Atualmente é Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento da empresa Conprove Engenharia, atuando principalmente nos seguintes temas: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência e Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência.



**Paulo Sérgio Pereira Jr** graduou-se em Engenharia Elétrica em 2004 pela Universidade Federal de Uberlândia, UFU. Também se formou em Administração de Empresas em 2006 pela UFU, e concluiu MBA pela Fundação Getúlio Vargas, FGV, como especialista em Gestão de Projetos. É atualmente o diretor da empresa CONPROVE, com sede em Uberlândia, Brasil, uma empresa de alta tecnologia com foco em pesquisa e desenvolvimento de instrumentos elétricos de teste. É consultor, pesquisador e instrutor na área de sistemas elétricos e automação de subestações, e membro do CIGRE, sendo atualmente o correspondente brasileiro no WG B5.69.