



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

**APRIMORAMENTO DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO USANDO DADOS DE
UM TERMINAL: UMA INICIATIVA NACIONAL EMBARCADA EM DISPOSITIVO REAL**

**FELIPE V. LOPES (1); EDUARDO JORGE S. LEITE JR (2); JOÃO PAULO G. RIBEIRO (2);
ARTUR B. PIARDI (3); ALLAN V. SCHEID (3); GUILHERME ZAT (3); RENZO G. F. ESPINOZA (3)
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB) (1);
CONSULTORES INDEPENDENTES (2);
PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU (3)**

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento de um registrador digital de perturbações de tecnologia nacional que emprega algoritmos aprimorados para localização de faltas em linhas de transmissão usando medições fasoriais de um terminal. Técnicas de estimação fasorial, detecção de distúrbios e classificação de faltas são implementadas em um dispositivo microprocessado, propondo-se alternativas de aprimoramento para tais aplicações, bem como para o cálculo final das estimativas do local da falta. Para validar as funcionalidades implementadas, realizaram-se simulações em tempo real, demonstrando-se o bom desempenho e caráter inovador do dispositivo desenvolvido.

PALAVRAS-CHAVE

Fasores, linhas de transmissão, localização de faltas, registrador de perturbações.

1.0 INTRODUÇÃO

A localização de faltas em linhas de transmissão (LTs) consiste em um procedimento de grande importância para fins de aceleração da recomposição de sistemas elétricos interligados após a ocorrência de curtos-circuitos [1]. De fato, a partir do cálculo prévio de estimativas do local da falta, facilita-se a busca pelo defeito, acelerando as atividades de reparo da LT e, conseqüentemente, diminuindo a exposição do agente detentor do ativo a riscos regulatórios.

Dentre os algoritmos mais empregados em dispositivos comerciais de monitoração de LTs, destacam-se os baseados na análise de fasores fundamentais que utilizam dados de apenas um terminal da linha. Esses métodos possuem maior simplicidade do ponto de vista operacional e, portanto, requerem infraestrutura mais simples [1]. Essas técnicas se baseiam em informações fasoriais das tensões e correntes no regime permanente do defeito, sendo independentes da disponibilidade de um link de comunicação entre os terminais da LT [2].

Considerando o contexto supracitado, sabe-se que no Sistema Interligado Nacional (SIN), a grande maioria dos dispositivos localizadores de faltas fazem uso de tecnologias importadas, as quais empregam processos clássicos que retornam estimativas pontuais do local do defeito. Obviamente, alguns profissionais têm se especializado em procedimentos de localização de faltas, criando as suas próprias metodologias. Entretanto, nesses casos, por serem soluções não embarcadas em dispositivos registradores, as análises são tipicamente manuais, requerendo mais tempo e atenção para execução dos procedimentos.

Em situações práticas, o despacho de equipes de manutenção de LTs com falta é realizado tão logo estimativas do ponto do defeito sejam obtidas. Frequentemente, as equipes se dividem para buscar o defeito em áreas a jusante e a montante do ponto indicado pelos dispositivos localizadores ou pelos cálculos manuais, muito embora não haja certeza quanto à região onde a falta de fato se encontra. Tal incerteza pode consistir em um problema prático quando ocorrem oscilações espúrias nas estimativas calculadas do local da falta [3], podendo levar o ponto central da localização estimada a se distanciar sobremaneira do local real do defeito, fazendo com que a divisão das equipes seja ineficiente. Desse modo, é evidente a importância de desenvolvimentos que possam aprimorar e diversificar as metodologias embarcadas em dispositivos registradores reais, fato este motivador do presente trabalho.

Em uma iniciativa nacional para desenvolvimento de dispositivo Registrador de Perturbações e Medição Fasorial (RPMF), o Centro de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (AS.DT) do Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (FPTI-BR) envidou esforços em um projeto de pesquisa para desenvolvimento de soluções aprimoradas de localização de faltas em LTs, visando incorporar ao RPMF algoritmos com potencialidades e funcionalidades não encontradas em outros dispositivos disponíveis no mercado. Desenvolveram-se técnicas para a execução automatizada da localização de faltas em LTs, incluindo algoritmos aprimorados para estimação de fasores e detecção de início e fim de perturbação, bem como para a localização de faltas via campos de busca. No que se refere ao processo de estimativa do ponto do defeito, uma metodologia multiagente foi desenvolvida, incluindo ainda uma solução para acomodação de erros referentes a oscilações espúrias nas medições fasoriais.

Neste trabalho, apresentam-se os resultados obtidos da pesquisa realizada, explicando sumariamente algumas das etapas dos desenvolvimentos, cujo foco consistiu na incorporação de funcionalidades de localização de faltas no RPMF. Ademais, apresentam-se resultados de simulações em um *Real Time Digital Simulator* (RTDS) realizadas para fins de validação das soluções embarcadas no RPMF, destacando as potencialidades do dispositivo em procedimentos de localização de faltas em LTs.

2.0 FUNDAMENTOS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS USANDO MEDIÇÕES FASORIAIS

Em técnicas de localização de faltas baseadas na análise de medições fasoriais, realiza-se o cálculo da impedância de sequência positiva entre o ponto monitorado e o local da falta. Desse modo, estima-se indiretamente a distância de falta, o que justifica o fato dessas técnicas serem também chamadas de soluções de localização de faltas baseadas em impedância (LF-Z) [1]. Basicamente, tais métodos requerem a estimação de fasores de tensão e/ou corrente no período de regime permanente de falta. Por isso, para delimitar a janela de tempo de interesse, soluções para detecção de início e fim de distúrbio são necessárias. Ainda, as técnicas LF-Z dependem da seleção dos *loops* sensibilizados em cada tipo de falta, fato este que torna indispensável a implementação de algoritmos de seleção de fases ou de classificação de faltas [1],[3]. Visando explicar os principais fundamentos dos métodos LF-Z de um terminal, aqui representados pela sigla LF-Z1T, apresentam-se a seguir conceitos que permitirão o entendimento dos desenvolvimentos realizados no RPMF.

2.1 Estimação de fasores

A estimação de fasores é realizada por meio de filtros digitais aplicados às amostras janeladas dos valores instantâneos dos sinais elétricos medidos. No RPMF, emprega-se um algoritmo de um ciclo fundamentado na técnica proposta em [4], a qual é combinada com um filtro mímico adaptativo [5], aprimorando o cálculo de fasores na presença de componente CC de decaimento exponencial. Ressalta-se que as janelas de dados utilizadas funcionam como *buffers* de amostras, que atualizam o seu conteúdo a cada período de amostragem, descartando as amostras mais antigas e inserindo novas a cada passo de discretização [6]. Portanto, tal como em qualquer outro dispositivo fasorial, existe uma fase de transição dos fasores calculados. De fato, enquanto a janela não adentra completamente no período de falta, informações de pré-falta e de falta são utilizadas no cálculo dos fasores, culminando em saídas errôneas que não condizem com os valores esperados para o regime permanente de curto-circuito. Desse modo, em aplicações de localização de faltas, deve-se esperar um tempo de estabilização dos fasores, aqui denominado de T_{FASOR} , o qual deve ser maior que o tamanho da janela de dados utilizada, no RPMF, igual a um ciclo [2],[7].

Para exemplificar o processo de estimação fasorial do RPMF, apresenta-se na Figura 1 o cálculo do módulo de um fasor de corrente na presença de uma componente CC de decaimento exponencial resultante de uma falta em uma LT hipotética. No exemplo, antes do cálculo fasorial, considera-se a aplicação de um filtro anti-aliasing Butterworth com frequência de corte em 480 Hz e uma taxa de amostragem de 16 amostras/ciclo.

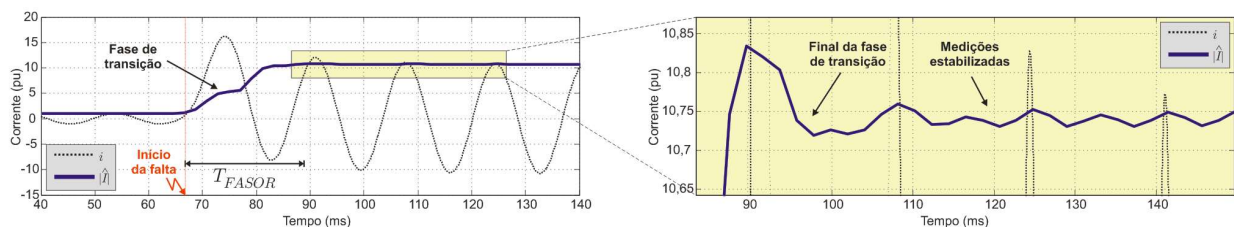


Figura 1. Exemplo de fasor estimado via RPMF para aplicação de métodos LF-Z1T.

Analisando a Figura 1, é nítida a fase de transição dos fasores, a qual se inicia após o início da falta, encerrando após aproximadamente um ciclo fundamental. Da análise da região ampliada, verificam-se ainda oscilações nos fasores estimados, que podem ser decorrentes de resquícios da componente CC de decaimento exponencial (quando não completamente amortecida) ou mesmo por eventuais desvios de frequência em relação aos valores nominais considerados no processo de janelamento de amostras [6]. Assim, em um processo de localização de faltas, mesmo que sejam empregadas funcionalidades de *frequency tracking*, é necessária a acomodação dessas oscilações, requerendo ainda algoritmos capazes de identificar os instantes inicial e final do curto-circuito, sendo esta última caracterizada pela abertura física dos polos dos disjuntores. Só assim, torna-se possível selecionar uma janela de tempo para cálculo da localização do defeito que contenha fasores estáveis e que acomode eventuais oscilações espúrias, tais como as verificadas na Figura 1.

2.2 Detecção do início e fim de falta, e classificação da falta

No RPMF, para detecção do início da falta, implementou-se a estratégia adaptativa proposta em [8], realizando adaptações nos sinais de entrada originalmente propostos para o algoritmo. Em resumo, o módulo da corrente incremental de sequência positiva $D/I1$ é analisado, aplicando-se duas janelas adjacentes, uma com Δk_{SE} amostras, e outra com Δk_{EN} amostras. Essas janelas podem ser configuradas para prover maior ou menor sensibilidade do algoritmo, sendo, neste trabalho, ajustadas com um mesmo comprimento. A janela Δk_{SE} encontra-se atrasada em relação às medições atuais de $D/I1$, sendo empregada no cálculo de um fator de sensibilidade chamado de ΔF_{SE} , o qual é dado pela razão dos valores máximo e mínimo de $D/I1$ no período avaliado da janela Δk_{SE} . Por outro lado, a

janela Δk_{EN} tem em sua primeira posição a amostra mais atual das medições, sendo empregada no cálculo do índice $\Delta DI1(k) = \frac{DI1(k)}{DI1(k - \Delta k_{EN} + 1)}$, ou seja, a razão entre primeira e última amostras da janela, tal como ilustrado na Figura 2.

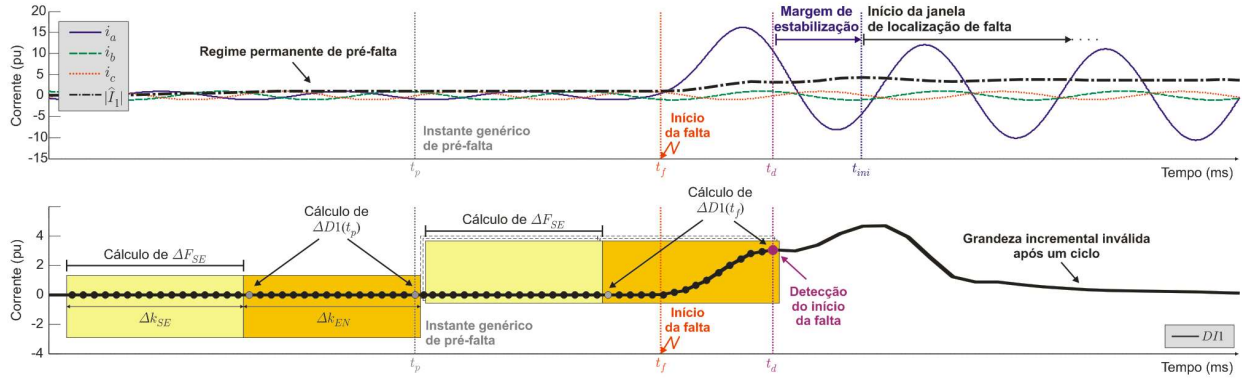


Figura 2 – Estratégia de detecção de início de distúrbio implementada no RPMF.

Matematicamente, a detecção é então realizada quando a seguinte relação é atendida:

$$\Delta DI1(k) = \frac{DI1(k)}{DI1(k - \Delta k_{EN} + 1)} > \Delta F_{SE} \cdot \eta_{MS}, \quad (1)$$

sendo η_{MS} uma margem de sensibilidade configurável, neste trabalho ajustada com o valor 3. Cabe ressaltar que no RPMF, a janela de amostras para cálculo da localização de faltas não tem início no mesmo instante em que a condição (1) é satisfeita, pois esta detecção pode ocorrer antes mesmo do tempo de estabilização dos fasores no regime permanente de curto-circuito. Assim, conforme ilustrado na Figura 2, após o instante de detecção da falta, considera-se uma margem de estabilização dos fasores, a qual é ajustada neste trabalho com um número de amostras equivalente a 1,5 ciclo fundamental. Sendo assim, após essa margem, inicia-se a janela de dados passível de utilização no procedimento de localização de faltas.

Adicionalmente, uma função para identificação do final da falta também foi embarcada no RPMF. A técnica se baseia na comparação dos módulos das correntes medidas após a detecção de um distúrbio, contando com um limiar estabelecido em função da corrente de pré-falta verificada no evento. Assim, se houve detecção de distúrbio, e sendo essa perturbação de fato uma falta, espera-se que os sistemas de proteção atuem, culminando na abertura dos disjuntores. Nesse instante, os fasores das correntes apresentam valores reduzidos de módulo, tendendo a serem menores do que os limiares ajustados. Neste trabalho, considerou-se um limiar de 10% da corrente de sequência positiva no regime permanente de pré-falta. Ainda, deve-se destacar que o efeito da estabilização dos fasores devido à janela de dados é verificado tanto no início da perturbação (a partir de t_f na Figura 3) quanto no final do evento após a abertura dos disjuntores (t_{dj}). Assim, uma vez atendida a condição de “corrente reduzida” após a abertura do disjuntor na fase analisada (em t_{ddj}), adota-se como instante final de distúrbio (t_{fim}) a amostra com estampa de tempo atrasada de uma margem fasorial, da mesma ordem do número de amostras da janela de dados utilizada na estimação dos fasores. No RPMF, uma vez que a estimação fasorial é realizada considerando uma janela de dados de um ciclo fundamental, tal margem foi ajustada como sendo um ciclo acrescido de margem de segurança adicional de meio ciclo, totalizando 1,5 ciclo fundamental. Assim, tal como ilustrado na Figura 3, durante o processamento de amostras dos fasores no RPMF, a janela de medições passíveis de utilização no procedimento de localização de faltas se inicia no instante $t_{ini} = t_d + \text{Margem de Estabilização}$, e encerra no instante $t_{fim} = t_{ddj} - \text{Margem Fasorial}$.

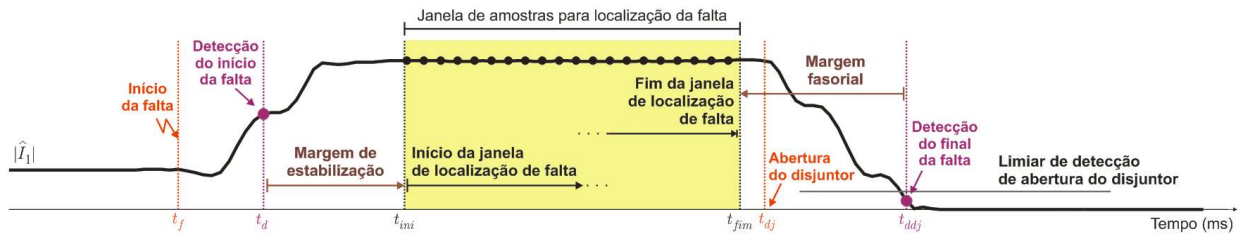


Figura 3 – Janela de tempo para cálculos de localização de faltas no RPMF.

Uma vez estabelecidas as amostras de regime permanente de curto-circuito, realiza-se então a classificação da falta. Nas aplicações LF-Z1T do RPMF, apesar da seleção de fases se mostrar suficiente, optou-se por proceder com a classificação da falta dentre os dez tipos tradicionais, a saber, AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC. No RPMF, foram implementados métodos de sobrecorrente incremental de fase e de análise de componentes de sequência [1],[9]. Ambas as soluções foram testadas e validadas via testes em RTDS, cujos resultados, por motivos de espaço, não serão detalhados. Ressalta-se que as duas metodologias se encontram aptas para ativação no RPMF, sob escolha do usuário, mas neste trabalho, optou pelo uso do método das correntes incrementais.

2.3 Cálculo do Local de Falta

Visando identificar metodologias robustas para aplicação no módulo localizador de faltas do RPMF, implementaram-se oito algoritmos LF-Z1T reportados na literatura, a saber: 1) Takagi Clássico (TAK) [10],[11]; 2) e 3) Takagi com polarização por sequência negativa (TAK2) e por sequência zero (TAK0), respectivamente [10]; 4) e 5) Takagi modificado com polarização por sequência negativa (MTAK2) e por sequência zero (MTAK0) [2],[10]; 6) Método de Eriksson (ERI) [12]; 7) Método de Wisniewski (WIS) [13]; 8) Método de Xu (XU) [14]. Dentre esses métodos, TAK, TAK2, TAK0, MTAK2, MTAK0 e ERI são baseados no modelo de LT curta, sendo apenas o método XU baseado em modelo de LT longa. Desse modo, o método de XU requer conhecimento dos parâmetros série e *shunt* da LT, enquanto os demais dependem apenas de dados da impedância série da LT, podendo necessitar ou não de informações sobre as impedâncias equivalentes de Thévenin nas barras terminais da LT monitorada, conforme reportado em [2]. Na Tabela 1, listam-se as principais informações sobre as referidas técnicas LF-Z1T, onde \tilde{d} representa a estimativa do local da falta, sendo \hat{V}_L e \hat{I}_L a tensão e corrente de *loop*, conforme descrito em [1], [2], $\Delta\hat{I}_L$ a corrente de *loop* incremental, \hat{I}_0 a corrente de sequência zero e \hat{I}_2 a corrente de sequência negativa.

TABELA 1 – Métodos LF-Z1T implementados no RPMF

Método	Fórmula	Número da equação	Parâmetros de linha	Equivalentes de Thévenin
TAK	$\tilde{d} = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L \cdot \Delta\hat{I}_L^*\}}{\text{Im}\{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot \Delta\hat{I}_L^*\}}$	(2)	Impedância série	Não
TAK2	$\tilde{d} = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L \cdot \hat{I}_2^*\}}{\text{Im}\{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot \hat{I}_2^*\}}$	(3)	Impedância série	Não
TAK0	$\tilde{d} = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L \cdot 3\hat{I}_0^*\}}{\text{Im}\{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot 3\hat{I}_0^*\}}$	(4)	Impedância série	Não
MTAK2 ^a	$\tilde{d} = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L \cdot \hat{I}_2^* \cdot e^{-j\alpha_m}\}}{\text{Im}\{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot \hat{I}_2^* \cdot e^{-j\alpha_m}\}}$	(5)	Impedância série	Sim
MTAK0 ^a	$\tilde{d} = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L \cdot 3\hat{I}_0^* \cdot e^{-j\alpha_m}\}}{\text{Im}\{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L \cdot 3\hat{I}_0^* \cdot e^{-j\alpha_m}\}}$	(6)	Impedância série	Sim
ERI ^b	$\tilde{d} = \frac{\left(a_1 - \frac{a_3 b_1}{b_3}\right) \pm \sqrt{\left(a_1 - \frac{a_3 b_1}{b_3}\right)^2 - 4\left(a_2 - \frac{a_3 b_2}{b_3}\right)}}{2}$	(7)	Impedância série	Sim
WIS ^c	$\tilde{d} = \frac{\text{Im}\{Z_M\}}{\text{Im}\{Z_{L1}\}} - \frac{\frac{\text{Re}\{Z_M\}}{\text{Im}\{Z_{L1}\}} \cdot \tan \phi_{L1} - \frac{\text{Im}\{Z_M\}}{\text{Im}\{Z_{L1}\}}}{\left(\frac{a}{b}\right) \cdot \tan \phi_{L1} - 1}$	(8)	Impedância série	Não
XU ^d	$\tilde{d} = \text{Re}\left(\frac{Z_{MX}^{corr}}{Z_{L1}}\right)$	(9)	Impedância série e admitância <i>shunt</i>	Não

^aSendo: $|q_m| \angle \alpha_m = \frac{(Z_{LSm} + Z_{RSm} + \ell \cdot Z_{Lm})}{Z_{RSm} + (\ell - d_{pre}) \cdot Z_{Lm}}$, em que ℓ é o comprimento da LT, Z_{LSm} e Z_{RSm} são as impedâncias das fontes equivalentes de Thévenin nos terminais local e remoto, respectivamente, para a componente de sequência $m = 0$ ou 2 , Z_{Lm} é a impedância da linha na sequência $m = 0$ ou 2 e d_{pre} é uma pré-localização de faltas, tipicamente obtida pelos métodos TAK, TAK2 ou TAK0.

^bSendo: $k_1 = a_1 + jb_1 = \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L} + \left(1 + \frac{Z_{RS1}}{Z_{L1}}\right) \cdot \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L}$, $k_2 = a_2 + jb_2 = \left(1 + \frac{Z_{RS1}}{Z_{L1}}\right) \cdot \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L}$, $k_3 = a_3 + jb_3 = \frac{\Delta\hat{I}_L}{Z_{L1} \cdot \hat{I}_L} \cdot \left(1 + \frac{Z_{LS1} + Z_{RS1}}{Z_{L1}}\right)$, onde Z_{LS1} e Z_{RS1} representam as impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin nos terminais local e remoto, respectivamente. Neste método, conforme demonstrado em (7), duas estimativas são calculadas, sendo selecionada como estimativa válida aquela que for positiva e menor ou igual a ℓ .

^cSendo: $a = \text{Re}\left(\frac{\Delta\hat{I}_L}{\hat{I}_L}\right)$ e $b = \text{Im}\left(\frac{\Delta\hat{I}_L}{\hat{I}_L}\right)$. Em (8), ϕ_{L1} representa o ângulo da impedância da LT e Z_M a impedância aparente de *loop* medida.

^dSendo: $Z_{MX}^{corr} = \frac{Z_{L1}}{\gamma_1} \cdot \text{atanh}^{-1}\left(\frac{Z_{MX}}{Z_{c1}}\right)$, em que Z_{MX} é a impedância de *loop* calculada considerando o modelo pi-exato de LT, conforme reportado em [14], sendo γ_1 e Z_{c1} a constante de propagação e a impedância característica da LT de seq. positiva.

2.4 Tratamento Estatístico das Amostras de Localização de Faltas

Em caso de oscilações espúrias nos módulos e ângulos dos fasores estimados durante o regime permanente de falta, oscilações podem também surgir nas estimativas do local do defeito obtidas por meio das equações (2)-(9). Tais variações podem resultar em conclusões equivocadas sobre o local do curto-circuito na LT, visto que o procedimento tipicamente adotado por muitos consiste em considerar um instante de referência para coleta das amostras fasoriais a serem empregadas nos algoritmos LF-Z1T. Desse modo, em casos de oscilações mais severas, escolhendo-se inapropriadamente uma amostra no pico ou no vale de uma oscilação, erros relevantes podem ser verificados nas estimativas finais, muito embora tais variações ocorram comumente no entorno do valor correto do local da falta. Sendo assim, é comum o cálculo de médias, inclusive considerando em alguns casos médias ponderadas em que as amostras \tilde{d} nas extremidades da janela de cálculo (ver Figura 3) possuem menor peso, visto que estão mais próximas das fases de transição dos fasores no início e fim da falta. Entretanto, tais valores médios

das amostras \tilde{d} são afetados quando existem amostras muito discrepantes do valor correto d , comprometendo, portanto, a estimativa final do local da falta. Sendo assim, em [3], propõe-se uma metodologia de análise estatística das amostras \tilde{d} , as quais são avaliadas a partir dos índices obtidos da representação das estimativas \tilde{d} na janela de cálculo do local de falta em forma de *boxplots*.

Segundo [3], a efetividade do tratamento estatístico via *boxplots* das amostras \tilde{d} depende do tamanho da janela de cálculo da localização da falta, ou seja, o número de amostras em regime permanente de falta disponíveis para análise. De fato, com uma janela de cálculo muito curta, torna-se inviável acomodar as oscilações espúrias de forma satisfatória, ao contrário do que se verifica quando um maior número de amostras \tilde{d} se encontram disponíveis. Considerando o contexto supracitado, em [3], todos os índices típicos de *boxplots* são analisados, indicando-se a possibilidade de criação de campos de busca entre os quartis superior e inferior em casos de oscilações relevantes nas amostras \tilde{d} . Ademais, segundo [3], em casos de estimativas \tilde{d} estáveis, a atenção retorna para o cálculo de estimativas pontuais, podendo esta ser obtida a partir de qualquer um dos índices de *boxplot* obtidos, a saber: quartil superior (valor máximo para 75% das amostras \tilde{d}), mediana (valor máximo para 50% das amostras \tilde{d}) e quartil inferior (valor máximo para 25% das amostras \tilde{d}). Dos resultados reportados em [3], a mediana e o quartil inferior se mostraram promissores, sendo a mediana eleita como índice a ser considerado nos cálculos de localização de faltas no RPMF. Tal escolha se fundamentou no fato da mediana ser a amostra de valor central dentre todas as disponíveis na janela de cálculo de \tilde{d} , evitando tendências de variação para mais e para menos em relação à distância d .

Para exemplificar as conclusões quanto ao benefício do uso de medianas ao invés de médias aritméticas típicas, ou seja, sem ponderações, apresenta-se na Figura 4 uma análise comparativa de casos simulados em um RTDS para faltas em um sistema teste simplificado de duas barras conectadas por uma LT de 200 km. Os cenários testados contemplam a combinação de diferentes situações operacionais do sistema e diferentes características de falta, a saber, faltas AT a distâncias de 0,1 a 0,9 pu, com passos de 0,1 pu, iniciadas no pico e cruzamento por zero da tensão no ponto do defeito, assumindo um ângulo de carregamento da LT de aproximadamente 13 graus. Todos os curtos-circuitos analisados nesta etapa foram do tipo AT, considerando resistências de falta nulas (curtos-circuitos francos) e de 50 Ω . Ademais, consideraram-se faltas com duração de dois ciclos, assumindo atuações muito rápidas da proteção da LT para representação de cenários mais adversos do ponto de vista da análise fasorial em caso de aplicação de métodos LF-Z1T. Assim, as localizações \tilde{d} foram calculadas como sendo a mediana e a média sem ponderação, considerando duas metodologias: 1) usando todas as amostras do período de falta, sem eliminação das bordas de transição dos fasores; 2) usando apenas as amostras da janela de cálculo, desconsiderando as transições fasoriais no início e final da perturbação. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4 em forma de polígono de frequência acumulada, permitindo correlacionar o percentual de casos testados com os erros absolutos das estimativas \tilde{d} obtidas por meio do RPMF via método TAK quando empregadas as duas metodologias citadas.

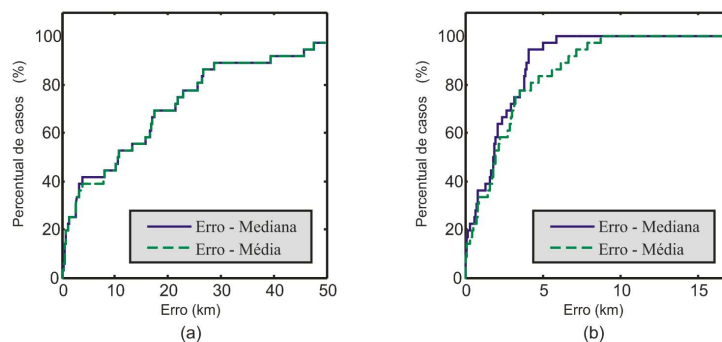


Figura 4 – Polígono de frequência acumulada para curtos-circuitos com duração de 2 ciclos considerando: (a) Uso de todas as amostras no período de falta; (b) Uso de amostras apenas na janela de cálculo.

Da Figura 4, percebe-se que a manutenção das amostras de transição fasorial durante o cálculo do local da falta não se mostra adequado, visto que prejudica o desempenho dos métodos LF-Z1T, seja considerando a mediana, seja utilizando a média. Da Figura 4(a), de fato, não se verifica uma diferença relevante entre os erros acumulados quando utilizadas mediana e média, resultando em erros significativos da ordem de dezenas de quilômetros. Por outro lado, analisando a Figura 4(b), ao considerar as margens de estabilização fasorial no início e fim do período de falta, tal como sugerido na Figura 3, percebe-se um melhor desempenho dos cálculos do local de falta, resultando em erros não superiores a 10 km (5% para a LT analisada), mesmo assumindo um período de falta curto (apenas 2 ciclos). Nesse caso, observa-se que o uso da mediana resulta em uma curva mais íngreme, que converge para 100% dos casos para um nível de erro máximo de aproximadamente 6 km. Em contrapartida, ao utilizar a média aritmética sem ponderação, obtém-se uma curva menos íngreme, com convergência para 100% dos casos para um nível de erro de aproximadamente 9 km. Desse modo, justifica-se a escolha do uso de medianas no RPMF, o qual, ao invés de adotar amostras pontuais, automaticamente calcula as medianas de interesse, promovendo um processo de localização de faltas mais robusto frente a eventuais oscilações das medições fasoriais de tensão e corrente.

3.0 VALIDAÇÃO DO RPMF

3.1 Testes em RTDS e análises preliminares

Conforme mencionado anteriormente, foram implementados oito métodos LF-Z1T no RPMF. Porém, cientes que as técnicas não apresentam o mesmo desempenho para diferentes situações de falta, optou-se pela realização de novos testes em RTDS, dividindo as análises em duas partes, inicialmente para validação das rotinas embarcadas visando a definição dos métodos a serem de fato usados no RPMF e, em um segundo momento, para análise de desempenho da solução desenvolvida. Os sistemas de 500 kV e 230 kV/60 Hz ilustrados na Figura 5(a) e (b), respectivamente, foram considerados para cada etapa, iniciando com o sistema da Figura 5(a), por viabilizar um controle mais simples das condições operativas da rede elétrica testada. Foram variadas as características de falta (instante de incidência, resistência, distância e tipo), bem como as condições operativas do sistema (como força das fontes e carregamento na LT). Os casos analisados são listados na Tabela 2 e os resultados obtidos são sumarizados na Tabela 3.

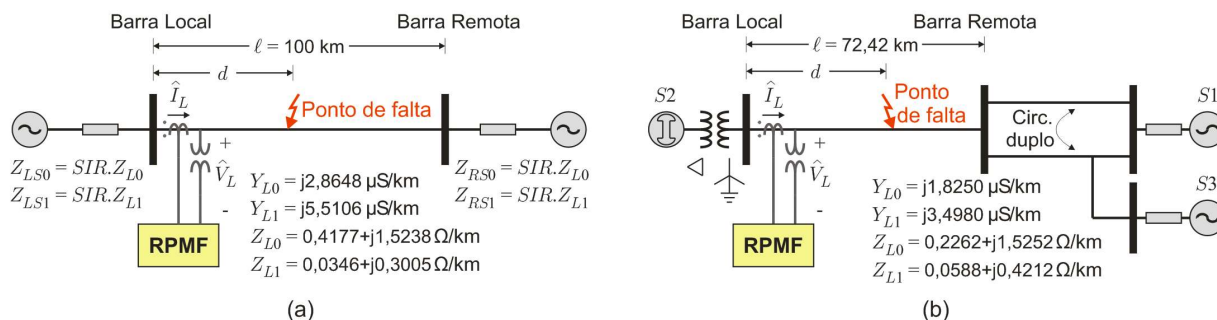


Figura 5 – Sistemas teste avaliados: (a) Validação de métodos; (b) Análise de desempenho do RPMF.

TABELA 2 – Casos analisados para validação dos métodos e análise de desempenho do RPMF

Variável	Validação dos Métodos	Análise de Desempenho do RPMF
Tipo de falta	AT, BC, BCT e ABC	AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC e ABCT
Ângulo de incidência	0° e 90° (referência senoidal)	
Local da falta	De 10% a 90% de ℓ com passos de 10%	
Resistência de falta	$\approx 0 \Omega$ (sólida) e 50Ω	$\approx 0 \Omega$ (sólida), 5Ω e 10Ω
Carregamento	Leve e pesado	Pesado
Força dos terminais	Forte e fraca	Forte

TABELA 3 – Avaliação dos métodos implementados no RPMF

Método	Níveis de erro obtidos					
	Faltas sólidas AT e BCT, carga pesada, terminação forte, iniciando no pico da tensão	Faltas AT, $RF = 50 \Omega$, carga pesada, terminações fortes e fracas, iniciando no pico da tensão e na passagem por zero	Faltas com tipos variados, $RF = 50 \Omega$, carga pesada, terminação fortes, iniciando no pico da tensão			
			AT	BC	BCT	ABC
TAK	< 2 km	< 11 km	< 5 km	< 5 km	< 5 km	< 2 km
TAK2	< 2 km	< 4 km	< 4 km	< 4 km	< 4 km	Divergiu
TAK0	< 2 km	< 4 km	< 4 km	Divergiu	Divergiu	Divergiu
MTAK2	< 2 km	< 4 km	< 4 km	< 4 km	< 4 km	Divergiu
MTAK0	< 2 km	< 4 km	< 4 km	Divergiu	Divergiu	Divergiu
ERI	< 4 km	< 15 km (≈ 20 km em outliers)	< 4 km (≈ 15 km em outliers)	< 4 km (≈ 15 km em outliers)	< 36 km (≈ 40 km em outliers)	< 22 km (≈ 30 km em outliers)
WIS	< 2 km	< 4 km	< 2 km	< 2 km	< 40 km	< 30 km
XU	< 2 km	< 24 km	< 6 km (≈ 12 km em outliers)	< 8 km (≈ 14 km em outliers)	< 8 km (≈ 14 km em outliers)	< 6 km (≈ 12 km em outliers)

Analisando a Tabela 3, nota-se que o método ERI apresentou mais casos com outliers, os quais foram tomados como sendo pontos de erro muito divergentes dos erros aferidos nos demais cenários de falta. Assim, verificou-se uma maior instabilidade do método ERI, o que pode ser explicado pela necessidade de resolução de fórmula de segundo grau em (7), requerendo a validação da localização final dentre duas estimadas (ver Tabela 1). Ademais, notou-se também que o método XU se mostrou mais sensível à presença de resistência de falta, se comparado com os demais métodos analisados. Ainda, os métodos TAK2, TAK0, MTAK2 e MTAK0 divergiram em alguns cenários, o que é

esperado, visto que dependem de componentes de sequência que não se fazem presentes em todos os tipos de curto-circuito (técnicas TAK0 e MTAK0 dependem da existência de sequência zero, sendo adequadas apenas para faltas com conexão para a terra, e técnicas TAK2 e MTAK2 dependem da presença de sequência negativa, cujas grandezas só existem teoricamente para faltas assimétricas). Nesse caso, apesar de necessitar de sequência negativa o método TAK2 se mostrou mais promissor do que as técnicas TAK0, MTAK2 e MTAK0.

Ainda analisando a Tabela 3, verificou-se um bom desempenho do método WIS para faltas monofásicas e bifásicas. Entretanto, notou-se sensibilidade do método à presença de resistência de falta em casos de faltas bifásicas-terra e trifásicas. Adicionalmente, identificou-se um bom desempenho do método TAK para todos os tipos de falta, sendo este o mais preciso para situações de faltas simétricas. Deve-se ressaltar que TAK apresentou em alguns cenários de falta AT sólidos erros maiores do que os obtidos por meio do algoritmo WIS, mas se mostrou mais promissor para faltas bifásicas-terra e trifásicas. Portanto, considerando as análises realizadas da Tabela 3, ficou definido que o RPMF utilizaria o método TAK2 para faltas assimétricas e o método TAK para curtos-circuitos simétricos, podendo empregar como variáveis auxiliares o método WIS em casos de faltas monofásicas e bifásicas, ou o algoritmo TAK em casos de faltas bifásicas-terra.

3.2 Estratégia para estimação do local da falta e cálculo de campo de busca

É importante mencionar que as conclusões apresentadas até então resultaram em um arranjo de métodos no RPMF parecido ao de alguns fabricantes, que também realizam a combinação dos métodos TAK e TAK2 para aplicações do tipo LF-Z1T, tal como em [7]. Dessa forma, é importante ressaltar que, considerando o conhecimento dos autores em relação à literatura aberta, são desconhecidos trabalhos que tenham comprovado quantitativamente a razão para tais escolhas, fato este agora esclarecido a partir dos resultados apresentados. Ainda assim, ressalta-se que a utilização dos métodos WIS e TAK para auxílio na validação das localizações estimadas consiste em desenvolvimento com teor inovador, diferenciando o RPMF dos produtos atualmente no mercado, inclusive do reportado em [7]. Adicionalmente, uma vez disponíveis as estimativas \tilde{d} obtidas via TAK, TAK2 e WIS, é possível criar uma metodologia para aprimoramento do procedimento de localização de faltas, contemplando o cálculo de campos de busca para auxílio de equipes de manutenção de LTs durante a inspeção do sistema defeituoso.

No RPMF, adotam-se as saídas dos métodos TAK e TAK2 como estimativas centrais $d_{central}$ para faltas simétricas e assimétricas, respectivamente, porém usando estimativas WIS e TAK como valores auxiliares d_{aux} . Portanto, se d_{aux} apresenta erros em relação ao local da falta, em termos práticos, é provável que exista também incerteza em relação à estimativa $d_{central}$, sendo recomendado um campo de busca mais abrangente. Caso contrário, se as estimativas $d_{central}$ e d_{aux} forem coincidentes, considera-se que é menor a probabilidade de existir uma discrepância entre as localizações estimadas e o local real do defeito, podendo-se considerar campos de busca reduzidos. Portanto, neste trabalho, são demonstrados resultados assumindo um campo de busca com extensão dada por $5 \cdot |d_{central} - d_{aux}|$, sendo a região de inspeção centralizada em $d_{central}$. Por fim, é importante mencionar que, como os métodos TAK2 e WIS não foram eleitos para utilização em casos de faltas simétricas, nesses casos, optou-se pelo uso de um campo de busca empírico, com abrangência de ± 5 km a partir de $d_{central}$.

4.0 RESULTADOS OBTIDOS

Para exemplificar a viabilidade da metodologia desenvolvida no RPMF, foram simulados os casos descritos anteriormente na Tabela 2, considerando agora o sistema de 230 kV da Figura 5(b)), o qual tem sido largamente utilizado na literatura para avaliação de funções de proteção, incluindo as LF-Z1T. Para facilitar a visualização do desempenho do RPMF, na Figura 6, apresentam-se os seguintes gráficos de resultados: a) Comparação de local de falta real e estimado; b) Análise de erros absolutos; c) Demonstração da abrangência dos campos de busca para casos válidos, ou seja, em que a falta foi de fato identificada dentro do campo de busca estimado. Nesse contexto, ressalta-se que de um total de 594 cenários analisados, 92,59% das faltas foram identificadas apropriadamente dentro do campo de busca estimado, comprovando o bom desempenho da metodologia embarcada no RPMF.

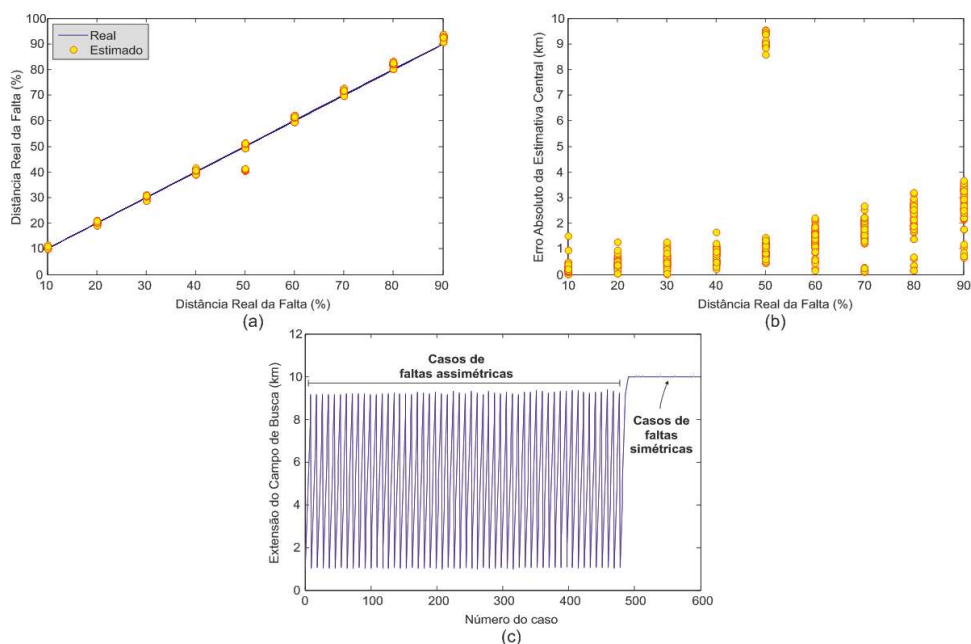


Figura 6 – Resultados obtidos dos testes no RPFM:

(a) Distâncias estimadas; (b) Erros absolutos; (c) Extensão dos campos de busca.

Da Figura 6(a), nota-se que os locais estimados se encontram muito próximos da reta de locais reais, demonstrando que as estimativas calculadas via RPFM foram precisas, exceto de alguns pontos mais próximos da região central da LT que apresentaram maior discrepância em relação à reta de referência. Tal fato se confirma na Figura 6(b), onde pode-se notar a presença de alguns pontos com erros da ordem de 9 km para casos de faltas em 50% da LT. Entretanto, ao avaliar os demais casos, que consistem na maioria dos cenários estudados, erros abaixo de 4 km foram observados, apresentando uma tendência de redução à medida que a falta se aproxima do terminal de medição, chegando a erros máximos de 2 km para faltas em 10% do terminal de referência. Como consequência desse comportamento, na Figura 6(c), percebe-se que os campos de busca estimados variam de extensão à medida que as faltas evoluem ao longo da LT, fazendo com que o gráfico apresentado se assemelhe a uma onda “dente de serra”. Tal comportamento se justifica pelo fato das simulações terem sido realizadas de maneira sequencial em termos da variação do ponto de curto-circuito. Assim, pode-se notar que as extensões dos campos de busca variaram de 1 km e 9,2 km para faltas assimétricas próximas ao terminal monitorado e próximas ao terminal remoto, respectivamente. Por outro lado, para faltas simétricas, todos os campos de busca apresentaram extensão de 10 km, conforme esperado, visto que não são calculados com base nas estimativas \tilde{d} .

Diante das análises descritas, conclui-se que o RPFM apresentou desempenho bastante satisfatório, especialmente quando levado em consideração que o mesmo constitui um hardware com algoritmos de um terminal, realizando todas as análises automaticamente e ainda promovendo aprimoramentos baseados no uso de medianas e no cálculo da localização da falta por meio de uma estratégia multiagente. Desse modo, pode-se dizer que, em se tratando de um dispositivo de tecnologia nacional, o RPFM tem teor inovador no país e até em âmbito mundial, visto que aplica estratégias até então não empregadas em outros dispositivos disponíveis no mercado.

5.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se o desenvolvimento de um dispositivo registrador com módulo para localização de faltas em linhas de transmissão que possui tecnologia nacional. Diversos testes em RTDS foram realizados, visando identificar melhorias em relação às estratégias do mercado, bem como para identificar por meio de estudos quantitativos as melhores práticas que pudessem garantir um procedimento de localização de faltas confiável e preciso, desde a detecção do início do distúrbio até o procedimento final de estimação do local do defeito.

Inicialmente, estudos sobre os processos de estimação fasorial, detecção de início e fim de distúrbio e classificação de faltas foram realizados. Uma vez implementadas tais soluções, oito métodos de localização de faltas baseados em análises fasoriais de um terminal foram embarcados no dispositivo registrador em desenvolvimento, aqui chamado de RPFM. Esses métodos foram avaliados por meio de simulações em massa em um sistema teste de 500 kV/60 Hz, permitindo a identificação das técnicas mais promissoras em termos de precisão e estabilidade.

Ao final das análises preliminares, três metodologias foram escolhidas para compor o módulo localizador de faltas embarcado no RPFM, incluindo funcionalidades inéditas voltadas para acomodação de oscilações nos fasores estimados durante o cálculo de local da falta, bem como para a estimação de campos de busca confiáveis capazes de auxiliar equipes de manutenção durante a inspeção de linhas. Por fim, da análise de 594 cenários de falta em um

sistema de 230 kV/60 Hz, foi possível comprovar o bom desempenho das funcionalidades desenvolvidas no RPMF, inclusive demonstrando a eficiência dos campos de busca estimados. Esses campos apresentaram extensões que variaram de 1 km a 9,2 km para o sistema testado, a depender do local da falta, identificando corretamente as regiões do defeito em mais de 92% dos casos estudados. Como próximas etapas dos desenvolvimentos, espera-se incorporar funcionalidades de localização de faltas usando dados fasoriais de dois terminais no RPMF.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAHA, M. M., IZYKOWSKI, J. J., ROSOLOWSKI, E., *Fault location on power networks*. Springer, 2009.
- [2] ZIMMERMAN, K., COSTELLO, D., "Impedance-Based Fault Location Experience," IEEE Rural Electric Power Conference, 2006, pp. 1-16, 2006.
- [3] LOPES, F. V., LEITE JR, E. J. S., RIBEIRO, J. P. G., PIARDI, A. B., ESPINOZA, R. G. F., SCHEID, A. V., ZAT, G., OTTO, R. B., "Phasor-based fault location challenges and solutions for transmission lines equipped with high-speed time-domain protective relays." *Electric Power Systems Research*, 189, 106617, 2020.
- [4] GOERTZEL, G. "An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series." *The American Mathematical Monthly* 65.1, 34-35, 1958.
- [5] SILVA, K., KUSEL, B. "Phasor estimation using a modified sine filter combined with an adaptive mimic filter." *International Conference on Power System Transients (IPST)*, 2001.
- [6] PHADKE, A. G., THORP, J. S., *Computer relaying for power systems*. John Wiley & Sons, 2009.
- [7] SEL-T400L Instruction Manual. 2018. Schweitzer Engineering Laboratories.
- [8] LOPES, F. V., FERNANDES, D., NEVES, W. L. A. "A traveling-wave detection method based on park's transformation for fault locators." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28.3, 1626-1634, 2013.
- [9] ADU, T. "An accurate fault classification technique for power system monitoring devices." *IEEE transactions on Power Delivery*, 17.3, 684-690, 2002.
- [10] DAS, S., SANTOSO, S., GAIKWAD, A., PATEL, M., "Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application." *IEEE access*, 2, 537-557, 2014.
- [11] TAKAGI, T., YAMAKOSHI, Y., YAMAURA, M., KONDOW, R., MATSUSHIMA, T., "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892 –2898, 1982.
- [12] EIKSSON, L., SAHA, M., ROCKEFELLER, G. D., "An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, 1985.
- [13] WISZNIEWSKI, A., "Accurate fault impedance locating algorithm," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 130, no. 6, pp. 311 –314, 1983.
- [14] XU, Z. Y., HUANG, S. F., RAN, L., FIU, J. F., QIN, Y. L., YANG, Q. X., HE, J. L., "A distance protection relay for a 1000-kv UHV transmission line," *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 1795–1804, 2008.

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 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 Faltas, e Transitórios Eletromagnéticos.



EDUARDO JORGE SILVA LEITE JUNIOR possui graduação em Engenharia de Energia, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB), concluídos em 2015, 2016 e 2020, respectivamente. Atualmente é pesquisador independente nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Faltas, e Transitórios Eletromagnéticos.



JOÃO PAULO GOMES RIBEIRO possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (UnB), concluídos em 2017 e 2019, respectivamente. Atualmente é engenheiro da Força Aérea Brasileira e pesquisa nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Faltas, e Transitórios Eletromagnéticos.



ARTUR BOHNEN PIARDI possui graduação (2012) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e doutorado (2017) pela Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC/USP), ambos em engenharia elétrica com ênfase em sistemas elétricos de potência. Atualmente é pesquisador do Centro de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (AS.DT) da Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (FPTI-BR), desempenhando atividades em simulação de sistemas elétricos e de P&D para o setor elétrico. Suas áreas de interesse são estabilidade, proteção e controle de sistemas elétricos de potência, e integração de geração distribuída, fontes renováveis e armazenamento de energia nestes.



ALLAN VICENTE SCHEID possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná concluída em 2013 e pós-graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Automação pela UniBF concluída em 2021. Trabalhou como Analista de Sistemas para Automação Industrial no Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI) de 2013 a 2015 e na Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE) de 2016 a 2021. Tem experiência nas áreas de Sistemas Embarcados, Sistemas de Tempo Real, Registradores de Perturbações, Localização de Faltas e Monitoramento de Plantas do Setor de Geração e Distribuição de Energia.



GUILHERME ZAT Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE (2011). Atualmente é Engenheiro Eletricista da Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil, atuando principalmente nas seguintes áreas: desenvolvimento em projetos de pesquisa aplicados ao setor de energia (automação, controle e proteção) e no desenvolvimento de projetos de sistemas embarcados (hardware, software e firmware). Desde 2020 participa do programa de mestrado em Engenharia Elétrica e Computação da UNIOESTE.



RENZO FABIÁN ESPINOZA possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Nacional de Engenharia do Peru (2008), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2011) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2015). Foi pesquisador de pós-doutorado na UFPB e UNICAMP entre 2016 e 2018. Atualmente é pesquisador no Parque Tecnológico Itaipu – Brasil, onde atua principalmente nas áreas de simulação em tempo real e automação de sistemas elétricos de potência.