

MÉTODO GENERALISTA PARA SELEÇÃO DE FASES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: UMA SOLUÇÃO PARA TERMINAIS COM GERAÇÕES CONVENCIONAIS OU BASEADAS EM INVERSORES

Felipe Lopes (*)
UNIVERSIDADE
FEDERAL DA
PARAÍBA

Moisés Davi
UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO

Raphael Reis
UNIVERSIDADE
FEDERAL DA
PARAÍBA

Eduardo Leite Jr.
CONSULTOR
INDEPENDENTE

Guilherme Zat
FUNDAÇÃO
PARQUE
TECNOLÓGICO
ITAIPU

Allan Scheid
CONSULTOR
INDEPENDENTE

Nicolas Pereira
FUNDAÇÃO
PARQUE
TECNOLÓGICO
ITAIPU

Paulo Godoy
FUNDAÇÃO
PARQUE
TECNOLÓGICO
ITAIPU

Guilherme Justino
FUNDAÇÃO
PARQUE
TECNOLÓGICO
ITAIPU

Mário Oleskovicz
UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho um método alternativo de seleção de fases para aplicações em linhas de transmissão. O método proposto possui a flexibilidade de operar por meio da análise de desequilíbrios de corrente ou tensão, podendo ser esses sinais selecionados pelo usuário do algoritmo de acordo com os níveis de contribuição de curto-circuito nos terminais monitorados. Ademais, demonstra-se o desempenho e validação do método por meio de uma análise comparativa com outras técnicas de seleção de fases existentes, incluindo testes com registros oscilográficos reais e simulados.

PALAVRAS-CHAVE

Comissionamento, IBR, Linha de Transmissão, Proteção, Sistemas Elétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Procedimentos de seleção de fases são indispensáveis para esquemas de proteção e localização de faltas em linhas de transmissão (LTs). A correta seleção dos *loops* de falta permite a análise apenas das grandezas sensibilizadas pelo distúrbio, viabilizando uma tomada de decisão correta [1]. Assim, decisões incorretas dos algoritmos de seleção de fases podem levar proteções e localizadores de faltas a operar indevidamente, sendo este um campo ainda aberto para melhorias, especialmente se considerado o contexto da massiva integração de fontes interconectadas por inversores (IBRs) [2].

Visando contribuir no contexto supracitado, desenvolve-se neste trabalho um algoritmo de seleção de fases chamado de Sequência Zero Virtual (SZV). Trata-se de um método generalista que opera a partir da análise de desequilíbrios de corrente ou tensão, provendo flexibilidade para aplicações em terminais fortes e fracos, respectivamente. Em terminais fortes, onde desequilíbrios de corrente são mais significativos do que os de tensão, escolhem-se sinais de corrente como entradas. Por outro lado, em terminais fracos, a exemplo de terminais de interligação de IBRs [1], os desequilíbrios de tensão são mais evidentes do que os de corrente, sendo então sinais de tensão utilizados como entradas do algoritmo. Em ambos os casos, apenas medições fasoriais são avaliadas para estimar as grandezas SZV, fazendo uso de uma metodologia generalista com abordagem similar para tensões e correntes. Tal desenvolvimento está inserido no escopo de um projeto de pesquisa e desenvolvimento que visa o aprimoramento do Registrador de Perturbações e Medição Fasorial (RPMF), o qual se encontra em desenvolvimento no Parque Tecnológico Itaipu [3] e em constante aprimoramento. Assim, este trabalho se enquadra no escopo de iniciativas para tornar o RPMF flexível para aplicações de localização de faltas em LTs de interconexão de gerações convencionais e em LTs de interconexão de IBRs.

Para validar o novo método, diferentes soluções de seleção de fases são avaliadas, a exemplo de técnicas baseadas em sobrecorrente incremental, grandezas de sequência, e na análise de tensões (desenvolvida no contexto de integração de IBRs). No total, incluindo o método proposto, quatro metodologias são analisadas, tornando os estudos mais abrangentes e confiáveis. Nesta etapa, são considerados registros oscilográficos obtidos em PSCAD, nos quais um sistema típico de interligação de IBR é considerado, contemplando diferentes modelos de geração, tais como unidades eólicas dos tipos III e IV com dois diferentes tipos de controle. Na sequência, usando um Real-Time Digital Simulator (RTDS), realiza-se uma segunda etapa de análise, agora considerando o método proposto embarcado no RPMF operando em um esquema "*hardware-in-the-loop*" para cenários de falta em uma LT que interliga uma planta fotovoltaica ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Ao final, registros oscilográficos reais são avaliados para demonstração da aplicação do novo método em cenários reais de curtos-circuitos ocorridos em LTs de alta tensão do SIN.

(*) 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

2.0 - MÉTODO PROPOSTO BASEADO EM GRANDEZAS DE SEQUÊNCIA ZERO VIRTUAL (SZV)

O método SZV proposto se baseia no cálculo de grandezas de sequência zero, porém considerando como entradas da transformação clássica de Fortescue fasores fundamentais obtidos nos períodos de falta e pré-falta. Assumindo uma grandeza fasorial genérica \hat{X} , em que \hat{X} pode representar fasores de tensão \hat{V} ou fasores de corrente \hat{I} , a partir da teoria clássica de componentes simétricas, sabe-se que as componentes de sequência zero \hat{X}_0 do sinal trifásico avaliado podem ser obtidas usando [4]:

$$\hat{X}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\hat{X}_a + \hat{X}_b + \hat{X}_c), \quad (1)$$

onde \hat{X}_0 consiste na componente de sequência zero obtida a partir das grandezas de fase \hat{X}_a , \hat{X}_b e \hat{X}_c , que podem consistir em tensões ou correntes nas fases.

Nota-se que em condições equilibradas, \hat{X}_0 tende a ser nulo, visto que $\hat{X}_a + \hat{X}_b + \hat{X}_c = 0$, idealmente. Já em um cenário de desequilíbrios no sistema elétrico, tal combinação das grandezas de fase não resultará em \hat{X}_0 nulo. De fato, neste cenário, \hat{X}_0 crescerá em módulo para desequilíbrios mais relevantes, sendo ainda pequeno para desequilíbrios menos críticos. Neste contexto, é importante destacar que as componentes de sequência zero tradicionais só se manifestam em forma de tensão ou corrente quando existe algum nível de deslocamento de neutro e quanto há fluxo de corrente no neutro [4]. Desse modo, nota-se que as componentes de sequência zero tradicionais não permitem a análise de fases individualmente, visto que guardam informações restritas aos neutros. Porém, cientes de que em ambos os casos as grandezas de sequência zero são excitadas em situações de desequilíbrio, utiliza-se neste trabalho o mesmo fundamento, porém visando a identificação de desequilíbrios segregados por fase via método proposto baseado em SZV.

As componentes propostas de SZV consistem em grandezas calculadas conforme (1), porém, utilizando informações do período de falta em uma fase por vez. Assim, adota-se uma fase de referência, para a qual são utilizadas entradas atuais dos fasores monitorados. Para as outras duas fases restantes, opta-se pelo uso de medições fasoriais de instantes anteriores, obtidos ainda do regime de pré-falta. Com isso, variações mais significativas das componentes de SZV só serão percebidas em casos nos quais a fase de referência apresentar grande variação. Portanto, partindo do pressuposto que o comportamento de tensões e correntes tende a não se alterar demasiadamente nas fases sem falta, garante-se que apenas nas fases defeituosas as componentes SZV irão apresentar variações relevantes, permanecendo as demais com valores baixos, compatíveis com os verificados em situações de operação normal. Para facilitar o entendimento do princípio de funcionamento descrito, apresentam-se a seguir as equações que descrevem a forma de cálculo das componentes \hat{X}_{0a} , \hat{X}_{0b} e \hat{X}_{0c} , que representam as componentes SZV para fases A, B e C, respectivamente.

$$\hat{X}_{0a} = \frac{1}{3} \cdot (\hat{X}_{af} + \hat{X}_{bp} + \hat{X}_{cp}), \quad (2)$$

$$\hat{X}_{0b} = \frac{1}{3} \cdot (\hat{X}_{ap} + \hat{X}_{bf} + \hat{X}_{cp}), \quad (3)$$

$$\hat{X}_{0c} = \frac{1}{3} \cdot (\hat{X}_{ap} + \hat{X}_{bp} + \hat{X}_{cf}), \quad (4)$$

onde os subscritos “p” e “f” se referem a medições fasoriais obtidas nos períodos de pré-falta e de falta.

No algoritmo SZV proposto, apenas os módulos dos fasores \hat{X}_{0a} , \hat{X}_{0b} e \hat{X}_{0c} são avaliados. Essa informação é suficiente, visto que apenas as componentes de SZV das fases envolvidas no defeito tenderão a apresentar elevação de amplitude. Assim, para facilitar a criação de limiares capazes de auxiliar na identificação das fases envolvidas na falta, propõe-se uma normalização dos módulos dos fasores \hat{X}_{0a} , \hat{X}_{0b} e \hat{X}_{0c} , criando-se então variáveis aqui chamadas de Energias Normalizadas (En). Para calcular as En de interesse, as seguintes fórmulas são aplicadas:

$$En_{XA} = \frac{|\hat{X}_{0a}|}{|\hat{X}_{0a}| + |\hat{X}_{0b}| + |\hat{X}_{0c}|}, \quad (5)$$

$$En_{XB} = \frac{|\hat{X}_{0b}|}{|\hat{X}_{0a}| + |\hat{X}_{0b}| + |\hat{X}_{0c}|}, \quad (6)$$

$$En_{XC} = \frac{|\hat{X}_{0c}|}{|\hat{X}_{0a}| + |\hat{X}_{0b}| + |\hat{X}_{0c}|}, \quad (7)$$

onde os subscritos “XA”, “XB” e “XC” se referem às grandezas de SZV de tensão ou corrente das fases A, B e C, respectivamente.

Nota-se que as En possuem um comportamento relativamente simples de prever, visto que seus valores são dados pela combinação dos módulos das grandezas de SZV, os quais crescem apenas nas fases com defeito. Assim, considerando 10 (dez) tipos de faltas possíveis em um sistema elétrico trifásico, é possível obter relações de En , tal como listado na Tabela 1. Conforme demonstrado, o menor valor esperado dentre os esperados para En é verificado no caso de faltas trifásicas, quando apresenta amplitude da ordem de $1/3 \approx 0,333$. Assim, por questões de sensibilidade, aplica-se no algoritmo proposto um limiar de 90% de 0,333, ou seja, de aproximadamente 0,29.

TABELA 1 – Valores gerais esperados para as energias normalizadas.

Tipo de falta	Valores dos sinais SZV			Valores esperados para as energias normalizadas En		
	$ \tilde{X}_{0a} $	$ \tilde{X}_{0b} $	$ \tilde{X}_{0c} $	En_{XA}	En_{XB}	En_{XC}
AT	↑	≈ 0	≈ 0	≈ 1	≈ 0	≈ 0
BT	≈ 0	↑	≈ 0	≈ 0	≈ 1	≈ 0
CT	≈ 0	≈ 0	↑	≈ 0	≈ 0	≈ 1
AB	↑	↑	≈ 0	≈ 1/2	≈ 1/2	≈ 0
BC	≈ 0	↑	↑	≈ 0	≈ 1/2	≈ 1/2
CA	↑	≈ 0	↑	≈ 1/2	≈ 0	≈ 1/2
ABT	↑	↑	≈ 0	≈ 1/2	≈ 1/2	≈ 0
BCT	≈ 0	↑	↑	≈ 0	≈ 1/2	≈ 1/2
CAT	↑	≈ 0	↑	≈ 1/2	≈ 0	≈ 1/2
ABC	↑	↑	↑	≈ 1/3	≈ 1/3	≈ 1/3

Legenda: ↑: Valor elevado; ≈ 0: Valor baixo.

Diante do exposto, percebe-se que faltas monofásicas e bifásicas, sejam elas com ou sem conexão para o terra, podem ser diferenciadas entre si por meio do algoritmo proposto, permitindo a seleção apropriada de *loops* fase-terra ou fase-fase, conforme previsto em esquemas de proteção gradativa ou localização de faltas por meio de dados de um terminal. Ainda, ressalta-se que o algoritmo permite identificar condições de curto-circuito trifásico, o que se mostra benéfico pelo fato do usuário ter flexibilidade em escolher o *loop* que deverá ser ativado nestes cenários. No RPF, por exemplo, habilita-se o *loop* AB, visando evitar interferências da componente de sequência zero. Mais detalhes sobre o RPF podem ser encontrados em [3].

É importante ainda comentar que, em termos de implementação, recomenda-se que as checagens das relações de En sejam realizadas ainda no início do período de falta, logo após a estabilização dos fasores estimados. Assim, evita-se que as dinâmicas das IBRs interfiram de forma significativa nos valores dos fasores dentro da janela de tomada de decisão. Assim, neste trabalho, prevê-se o uso de um detector de distúrbios, cuja operação assume-se ocorrer na amostra k_{det} da oscilografia analisada. Assim, a tomada de decisão do algoritmo seletor de fases é realizada na amostra $k_{det}+1,5N$, sendo N o número de amostras por ciclo no registro avaliado, ou seja, um ciclo e meio após a detecção.

3.0 - AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO BASEADO EM SZV POR MEIO DE SIMULAÇÕES NO PSCAD

Com o objetivo de validar o conceito operativo do método proposto, realizam-se inicialmente simulações no ambiente PSCAD, considerando uma rede elétrica de interconexão de uma planta IBR seguidora de rede. Esse sistema é considerado por ser capaz de reproduzir aspectos de terminais fracos, se consideradas medições no lado da IBR, bem como de terminais fortes, se consideradas medições no lado da rede. Na Figura 1, ilustra-se o sistema teste considerado, sendo mais detalhes encontrados em [5].

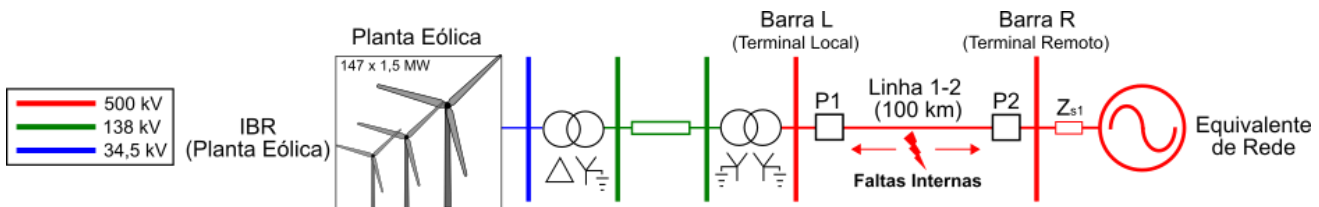


FIGURA 1 – Sistema teste com topologia típica de interconexão de IBR considerado na avaliação do algoritmo proposto.

Visando realizar simulações mais robustas, três tipos de IBR foram consideradas, a saber: *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG), *Full-Converter* (FC) com controles pioneiros (chamaremos aqui de FC+C1), ou seja, que emulam apenas correntes de sequência positiva, e por fim, uma unidade FC com controles compatíveis com as recomendações do padrão IEEE 2800-2022 [6] (chamaremos aqui de FC+C2), ou seja, que contemplam a emulação de correntes reativas de sequência positiva (para suporte da tensão da rede) e negativa (para favorecer o desempenho de funções de proteção baseadas em sequência negativa). Ainda, considerou-se a variação da força do equivalente de rede que representa o SIN (fraca, forte e muito forte), bem como as características de falta, variando-se tipo, resistência e local. Com isso, no total, foram simulados 47520 casos, permitindo realizar a primeira etapa de verificação de desempenho do método proposto.

Cabe esclarecer que, para aplicação do algoritmo proposto no RPF, vislumbra-se a escolha por parte do usuário dos sinais de entrada, ou seja, tensão ou corrente. Conforme explicado anteriormente, o uso de tensões se mostra adequado para terminais fracos, enquanto que o uso de correntes se mostra adequado para terminais fortes. Assim, para o sistema teste ilustrado na Figura 1, o algoritmo foi testado considerando tensões na Barra L (terminal local, no lado da IBR) e de correntes na Barra R (terminal remoto, no lado da rede). Além disso, outros três algoritmos disponíveis na literatura são avaliados conjuntamente para fins de comparação. Os algoritmos são baseados em: 1) Correntes incrementais (CINC) [7]; 2) Correntes de Sequência (CSEQ) [8]; e 3) Componentes de tensão para sistemas com IBRs (CVIBR) [9].

Antes de avaliar os métodos em si, é importante entender que a técnica CINC se baseia no princípio de sobrecorrente, o que se mostra um fator limitante para terminais de conexão de IBR, nos quais a contribuição de falta é limitada devido aos limitadores empregados para proteger os elementos de eletrônica de potência dos inversores. Já o método CSEQ se baseia na comparação entre componentes de sequência, avaliando relações entre elas de modo a identificar o *loop* de falta envolvido na perturbação. Assim, eventuais modulações nas grandezas de sequência podem se tornar um problema, tal como verificado na sequência negativa para algumas IBRs. Um fato curioso sobre o algoritmo CSEQ aqui considerado é que, no seu trabalho adotado como referência [8], apenas a seleção de fases para faltas com conexão para o terra é demonstrada, de modo que os resultados obtidos para faltas bifásicas sem terra serão aqui descartados. Por fim, o algoritmo CVIBR foi desenvolvido especificamente para sistemas fracos, de baixa inércia, com integração de IBRs. Desse modo, o método faz uso de tensões, tomando proveito da característica de terminal fraco nos pontos de conexão das IBRs.

Os resultados obtidos em termos de percentual de acertos da seleção de fases para diferentes tipos de curto-circuito simulados no PSCAD são apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, separadamente para os casos de IBRs dos tipos DFIG, FC+C1 e FC+C2, respectivamente. Em resumo, para faltas dos tipos AT, BT e CT, assumem-se como respostas corretas seleções de fase do tipo AT, BT e CT, respectivamente. Para faltas dos tipos AB ou ABT, BC ou BCT e CA ou CAT, consideram-se como respostas corretas seleções de fase do tipo AB, BC e CA, respectivamente. Adicionalmente, uma vez que curtos-circuitos trifásicos recaem em uma condição específica de seleção de fases, em cada cenário, verificou-se apenas se o tipo ABC foi identificado, sem considerar relação com a ativação específica de um dado *loop* de falta.

TABELA 2 – Análise comparativa de métodos considerando IBR do tipo DFIG.

Taxa de Acerto no Terminal da IBR (em %)										
Método	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
Sobrecorrente incremental (CINC)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
Correntes de sequência (CSEQ)	93,9	93,9	93,9	--	--	--	91,9	91,4	91,9	0,0
Componentes de tensão para IBRs (CVIBR)	96,2	96,2	96,2	100	100	100	99,1	99,1	99,1	100
Método Proposto (SZV)	100	100	100	100	100	100	99,6	99,6	99,6	100
Taxa de Acerto no Terminal da Rede (em %)										
Método	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
Sobrecorrente incremental (CINC)	100	100	100	97,7	96,7	90,9	66,3	64,6	47,4	100
Correntes de sequência (CSEQ)	100	100	100	--	--	--	99,5	99,4	99,5	0,0
Componentes de tensão para IBRs (CVIBR)	68,2	68,2	68,2	90,9	90,9	90,9	89,2	89,2	89,2	100
Método Proposto (SZV)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,5

TABELA 3 – Análise comparativa de métodos considerando IBR do tipo FC+C1.

Taxa de Acerto no Terminal da IBR (em %)										
Método	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
Sobrecorrente incremental (CINC)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	10,0	100
Correntes de sequência (CSEQ)	0,0	0,0	0,0	--	--	--	0,0	0,0	0,0	0,0
Componentes de tensão para IBRs (CVIBR)	97,0	97,0	97,0	100	100	100	99,1	99,1	99,1	100
Método Proposto (SZV)	100	100	100	100	100	100	99,6	99,6	99,6	100
Taxa de Acerto no Terminal da Rede (em %)										
Método	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
Sobrecorrente incremental (CINC)	100	100	100	100	100	100	83,5	83,2	74,1	100
Correntes de sequência (CSEQ)	100	100	100	--	--	--	99,6	99,6	99,5	0,0
Componentes de tensão para IBRs (CVIBR)	68,2	68,2	68,2	93,9	93,9	93,9	91,5	91,5	91,5	100
Método Proposto (SZV)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,2

TABELA 4 – Análise comparativa de métodos considerando IBR do tipo FC+C2.

Taxa de Acerto no Terminal da IBR (em %)										
Método	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
Sobrecorrente incremental (CINC)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
Correntes de sequência (CSEQ)	62,6	61,9	68,3	--	--	--	54,4	83,3	89,1	0,0
Componentes de tensão para IBRs (CVIBR)	96,4	96,4	96,4	100	100	100	99,1	99,1	99,1	100
Método Proposto (SZV)	100	100	100	100	100	100	99,6	99,6	99,6	100

Taxa de Acerto no Terminal da Rede (em %)										
Método	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
Sobrecorrente incremental (CINC)	100	100	99,7	100	100	100	69,6	66,9	55,4	100
Correntes de sequência (CSEQ)	100	100	100	--	--	--	99,6	99,5	99,5	0,0
Componentes de tensão para IBRs (CVIBR)	68,2	68,2	68,2	93,9	93,9	93,9	90,9	90,9	91,0	100
Método Proposto (SZV)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,2

Dos resultados obtidos, nota-se que o desempenho do método proposto é superior aos demais avaliados, o que é esperado para as técnicas CINC e CSEQ, as quais foram desenvolvidas no passado considerando as características das gerações convencionais. Assim, ao serem postas para operar em terminais de interconexão de IBRs, o desempenho é sobremaneira afetado, representando um problema crítico para esquemas que dependem da seleção de fases. Nota-se ainda que, no terminal da rede, os algoritmos CINC e CSEQ funcionam muito bem, assim como o método proposto SZV. Por outro lado, o método CVIBR não apresenta bom desempenho, visto que foca na análise de tensões, que pouco variam em terminais de redes fortes. Em contrapartida, ao avaliar os resultados para o terminal da IBR, percebe-se que os métodos CINC e CSEQ passam a apresentar graves problemas de desempenho, enquanto que o método proposto SZV e o CVIBR apresentam bom desempenho. Ainda assim, se comparados os métodos SZV (proposto) e CVIBR, apesar dos desempenhos satisfatórios de ambos, o método proposto ainda apresenta índices de acerto melhores sendo generalista em termos de aplicações em terminais com gerações convencionais ou do tipo IBR.

4.0 - AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO BASEADO EM SZV POR MEIO DE SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL

Como uma segunda etapa de avaliação do método proposto, realizou-se a programação do algoritmo SZV no dispositivo RPFM [3]. Com isso, tornou-se possível realizar testes do tipo “*hardware-in-the-loop*”, fazendo uso de um RTDS disponível no Parque Tecnológico Itaipu. Para tanto, modelou-se na plataforma RSCAD do RTDS o sistema ilustrado na Figura 2.

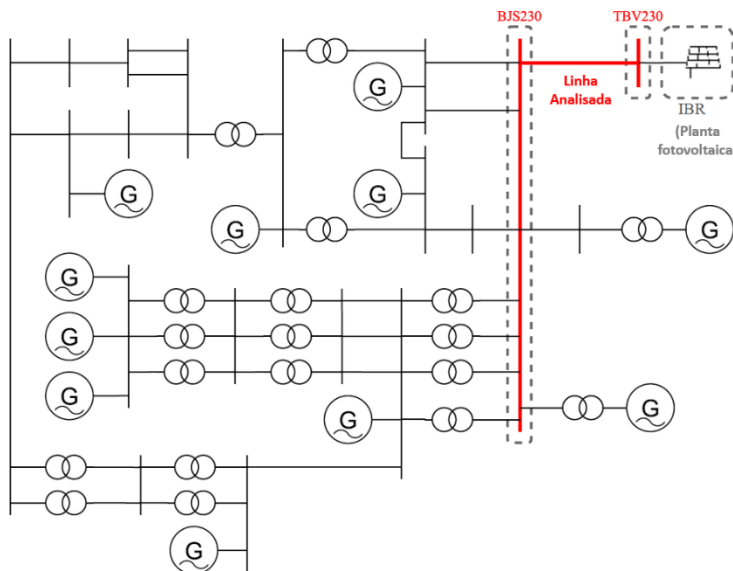


FIGURA 2 – Sistema teste considerado para avaliação do RPFM com algoritmo SZV embarcado em um RTDS usando o esquema “*hardware-in-the-loop*”.

O sistema ilustrado se refere a uma rede elétrica de 230 kV/60 Hz responsável pela interligação de uma planta fotovoltaica ao SIN. A LT analisada possui 149 km de extensão, interligando a subestação Tabocas do Brejo Velho (TBV), onde se encontra conectada a referida planta fotovoltaica, à subestação Bom Jesus da Lapa (BJS).

É oportuno explicar que, na modelagem da IBR considerada no RTDS, não foram contempladas implementações de controles sofisticados, tais como considerados na etapa anterior de simulações no PSCAD. Assim, a IBR foi modelada para sintetizar apenas componentes de sequência positiva, tal como os controles pioneiros de IBRs. Ademais, foram variadas características de falta, como local, resistência, tipo e ângulo de incidência, totalizando 228 casos simulados em um esquema “*hardware-in-the-loop*”. Desse modo, foi possível checar a viabilidade de aplicação do algoritmo proposto em um dispositivo real, neste caso, o RPFM.

Das análises realizadas, obteve-se que o algoritmo SZV desenvolvido apresentou acerto em 100% dos casos avaliados, fazendo uso de medições de corrente no lado da rede e de tensões no lado da IBR. Obviamente, reconhece-se que esse desempenho pode mudar, a depender da criticidade do curto-circuito e da influência de IBRs. Entretanto, os resultados obtidos dos estudos em RTDS corroboram com as conclusões da etapa de avaliação anterior, concluindo-se que o algoritmo proposto SZV é de fato confiável e viável do ponto de vista computacional para utilização em dispositivos microprocessados.

5.0 - VALIDAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO SZV POR MEIO DE OSCILOGRAFIAS REAIS

As duas etapas de avaliação anteriores focaram em levantar os percentuais de acertos do método proposto SZV com base em um grande número de casos. Ainda assim, apesar da validade dos resultados em termos de desempenho e viabilidade computacional para implementações em dispositivos microprocessados, como no RPF, reconhece-se a importância de checar o desempenho do método fazendo uso de oscilografias do mundo real.

Em virtude de questões de confidencialidade, detalhes sobre a origem das oscilografias estudadas serão omitidos, bastando saber que os cenários consistem em: 1) Registro AT em LT de interconexão de IBR considerando medições no lado da rede; 2) Registro AT em LT de interconexão de IBR considerando medições no lado da IBR; 3) Registro BC em terminal de LT com influência de IBRs próximas; e 4) Registro BC em LT de interconexão de IBR com grandezas medidas no lado IBR. Para realizar uma análise do uso de tensões e correntes no algoritmo proposto, em cada caso, as duas abordagens são ilustradas. Ademais, destaca-se que em todos os casos a tomada de decisão foi implementada para ocorrer na amostra $k_{det}+1,5N$, conforme explicado anteriormente, sendo este instante destacado nas figuras apresentadas.

5.1 Registro AT em LT de interconexão de IBR considerando medições no lado da rede

Os resultados para esse caso são apresentados na Figura 3. Nota-se uma elevada contribuição de corrente no sistema em questão, constatando que se trata de um sistema com elevado nível de curto-circuito. Apesar dessa característica, para o caso analisado, verificaram-se afundamentos de tensão relevantes, o que torna o caso atrativo para visualizar a operação do algoritmo proposto SZV em um terminal convencional fazendo uso de tensões e correntes.

Analisando as formas de onda, percebe-se que apenas as E_n referentes às tensões e correntes da fase A apresentam valores superiores ao limiar empregado, resultando em uma seleção de fases do tipo AT. Neste caso, mesmo percebendo que os procedimentos poderiam ser realizados de forma confiável por meio de tensões ou correntes, nota-se que as energias normalizadas das correntes são mais estáveis, sendo esses sinais recomendados para uso como entradas do algoritmo proposto SZV em virtude da comprovada força do terminal.

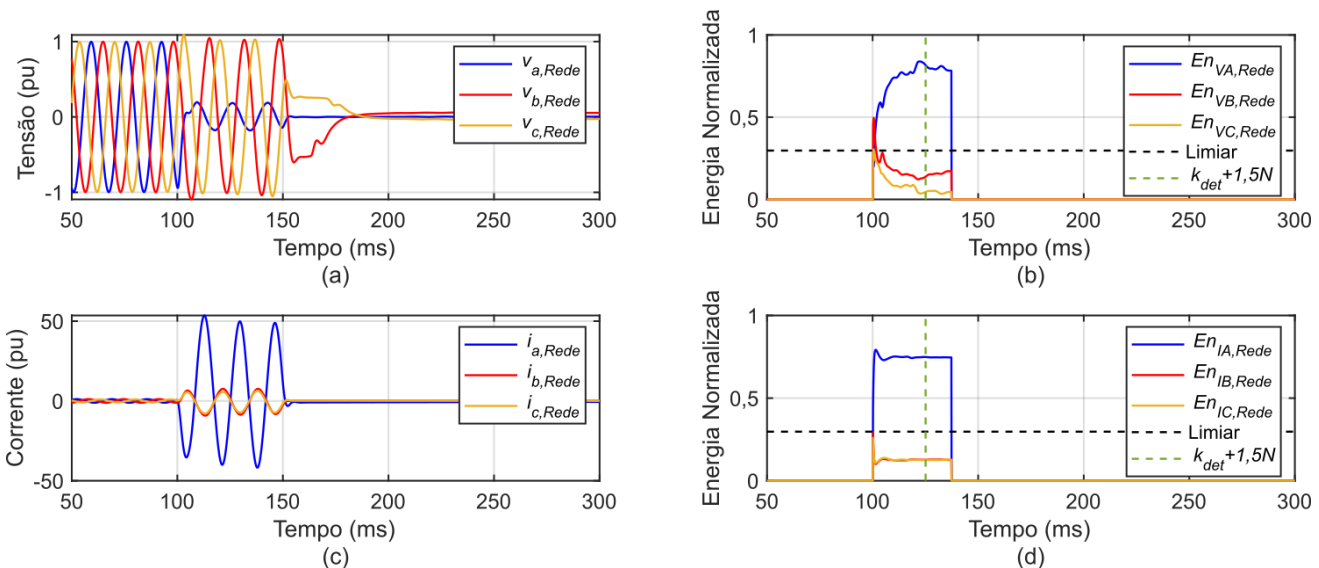


FIGURA 3 – Registro real de falta AT com grandezas medidas no terminal da LT no lado da rede: (a) Tensões; (b) Energias normalizadas de tensões; (c) Correntes; (d) Energias normalizadas de correntes.

5.2 Registro AT em LT de interconexão de IBR considerando medições no lado da IBR

A análise deste caso é realizada por meio da Figura 4. Em sendo as medições obtidas no terminal de LT no lado da IBR, as contribuições são limitadas, o que resulta em um comportamento atípico das correntes medidas e em um afundamento de tensão relevante na fase com falta. De fato, existe uma predominância de contribuições de corrente de sequência zero provenientes da rede que retornam pelos aterramentos dos transformadores. Com isso, as correntes se elevam e se alinham, caracterizando um sinal trifásico com elevado teor de sequência zero. Como consequência, as energias normalizadas de corrente E_{nI} das três fases se elevam, fazendo o seletor de fases indicar erroneamente uma condição de falta ABC. Por isso, nesse tipo de terminal com IBR, recomenda-se usar tensões como entradas do algoritmo. Na Figura 4, percebe-se que a energia normalizada da tensão E_{nV} resulta em uma seleção de fases AT, conforme esperado, contando ainda com uma boa margem de confiabilidade em relação às energias normalizadas das demais fases. Por isso, recomenda-se o uso de tensões no caso de terminais fracos de conexão de IBRs.

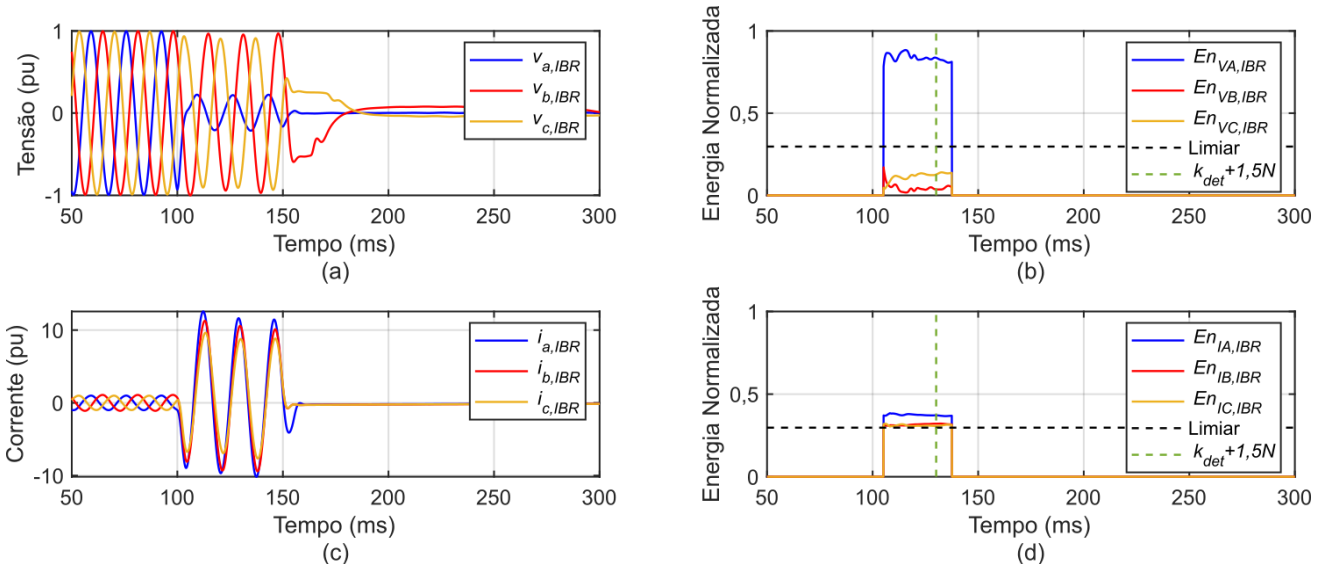


FIGURA 4 – Registro real de falta AT com grandezas medidas no terminal da LT no lado da IBR:
 (a) Tensões; (b) Energias normalizadas de tensões; (c) Correntes; (d) Energias normalizadas de correntes.

5.3 Registro BC em terminal de LT com influência de IBRs próximas

Este registro foi obtido de um sistema de transmissão, em cujo terminal de medição existe um grande montante de IBRs próximas. Apesar da conexão com as IBRs não ser direta, tal LT se mostra susceptível à influência dessas gerações, visto que contribuições atípicas são medidas no terminal em questão. Vale ressaltar que, em sendo uma falta sem conexão para o terra, ou seja, do tipo BC, não existe contribuição de sequência zero circulante pelo transformador de corrente do terminal analisado, o que resulta em correntes ditadas principalmente pelas contribuições de IBRs próximas, ou seja, distorcidas e limitadas. Em contrapartida, apesar de ser perceptível o afundamento de tensão nas fases defeituosas, o nível de afundamento de tensão neste caso é considerado moderado, o que torna este caso também elucidativo quanto ao uso de tensões ou correntes em terminais com elevada influência de IBRs.

Analisando as energias normalizadas, nota-se que, seja usando tensões, seja usando correntes, o seletor de fases baseado no algoritmo proposto SZV resultou na classificação BC, conforme esperado. Apesar do acerto para ambos os tipos de sinal de entrada, é notório que o uso de correntes é menos confiável, visto que as energias normalizadas são menos comportadas e mais próximas do limiar. Por outro lado, analisando tensões, nota-se que nos primeiros instantes de falta as condições de afundamento são suficientemente relevantes a ponto de permitir uma classificação confiável, sendo portanto recomendado que, em terminais com influência relevante de IBRs, sejam usadas tensões como sinais de entrada.

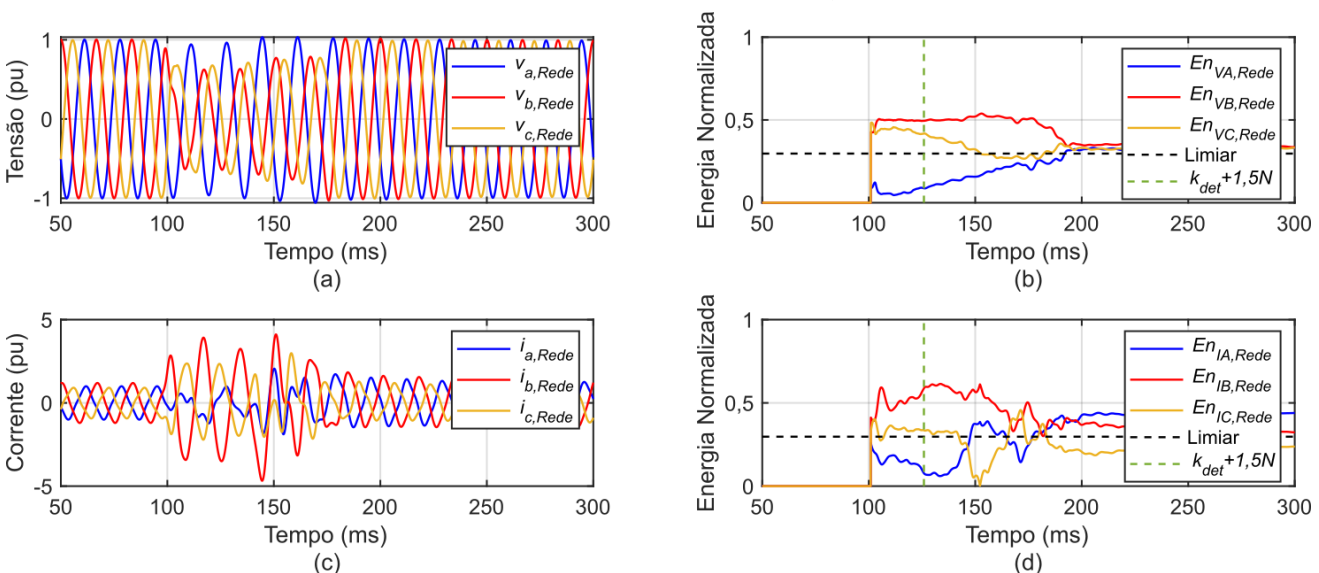


FIGURA 5 – Registro real de falta BC com grandezas medidas no terminal da LT no lado da rede sob influência de outras IBRs: (a) Tensões; (b) Energias normalizadas de tensões; (c) Correntes; (d) Energias normalizadas de correntes.

5.4 Registro BC em LT de interconexão de IBR com grandezas medidas no lado IBR

Assim como no caso anterior, este exemplo se refere a um caso de falta BC, porém agora contando com medições na LT no lado da IBR. As formas de onda são apresentadas na Figura 6. É possível observar a limitação das correntes de curto-circuito no lado da IBR, o que coloca em risco o uso de técnicas baseadas no princípio de sobrecorrente. Avaliando as energias normalizadas, percebe-se que o comportamento atípico das correntes resulta em uma seleção de fases errada, resultando equivocadamente em uma classificação AT. Tal característica é comum em terminais com IBRs e, por isso, conforme mencionado anteriormente, não se recomenda o uso de correntes como entradas do algoritmo SZV em terminais de IBR ou em terminais que possuem muitas IBRs próximas. Nesses casos, recomenda-se o uso de tensões, visto que os afundamentos de tensão, mesmo que moderados, resultam em E_n mais estáveis, garantindo uma tomada de decisão mais segura e confiável. De fato, conforme ilustrado, o uso de tensões garante uma operação correta do seletor de fases neste caso, demonstrando mais uma vez a robustez do algoritmo baseado em SZV desenvolvido neste artigo.

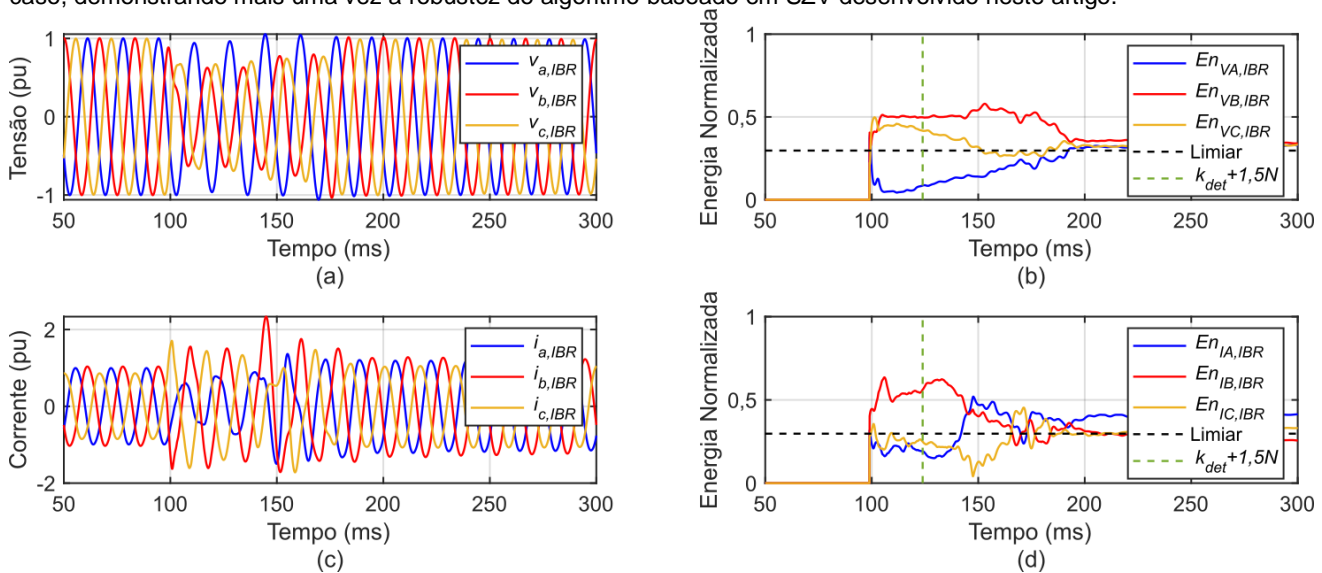


FIGURA 6 – Registro real de falta BC com grandezas medidas no terminal da LT no lado IBR:
(a) Tensões; (b) Energias normalizadas de tensões; (c) Correntes; (d) Energias normalizadas de correntes.

5.5 Considerações adicionais sobre o método proposto

Conforme explicado anteriormente, uma das principais potencialidades do método proposto consiste na sua flexibilidade em se utilizar tensão ou corrente, sem alterar os princípios de funcionamento. Com isso o algoritmo se torna generalista e, portanto, mais atrativo para aplicações nas quais o usuário tem a liberdade de escolher o tipo de sinal de entrada que deseja processar. Além disso, uma vez que o limiar utilizado é empregado na análise de grandezas normalizadas, o método se mostra independente dos parâmetros da rede elétrica monitorada, característica esta também bastante atrativa para aplicações em sistemas reais. Assim, considerando o contexto do desenvolvimento do RPMF, espera-se que o algoritmo generalista proposto permita um desempenho flexível do dispositivo, seja em terminais de conexão de gerações convencionais, seja em terminais com IBRs. De fato, segundo os resultados apresentados, o algoritmo proposto SZV se mostrou confiável quando aplicado em terminais com gerações convencionais e com IBRs, requerendo apenas a escolha de um sinal de entrada apropriado para a aplicação do algoritmo. Assim, as recomendações se resumem ao uso de tensões em terminais fracos e correntes em terminais fortes, sendo esta uma seleção passível de realização pelo próprio usuário do RPMF, ou mesmo por meio de algoritmos auxiliares internos ao dispositivo.

6.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, apresentou-se um novo algoritmo para seleção de fases baseado em um conceito inovador, aqui chamado de Sequência Zero Virtual (SZV). Dos resultados obtidos, nota-se que os desempenhos das metodologias de seleção de fases existentes variam significativamente a depender da força do sistema elétrico monitorado, enquanto que o desempenho do método proposto SZV não é afetado de maneira relevante. Considerando as dezenas de milhares de casos analisados, quando considerados os métodos convencionais, identificam-se bons desempenhos para os terminais com gerações fortes e de alta inércia, bem como bons desempenhos nos terminais com IBRs quando empregados algoritmos específicos para esse tipo de terminal. Entretanto, em geral, tais desempenhos caem abruptamente quando os métodos tradicionais são aplicados em terminais com IBRs, bem como quando métodos específicos para terminais com IBRs são aplicados em barras fortes. Por outro lado, de acordo com as análises apresentadas, o método proposto se manteve com excelente desempenho em todos os casos, apresentando taxa de acerto superior a 99% dos cenários estudados. Para tanto, necessita-se apenas da seleção adequada dos sinais de entrada, sem requerer mudança do algoritmo de seleção de fases.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. V. Lopes, M. J. B. B. Davi, M. Oleskovicz, A. Hooshyar, X. Dong and A. A. A. Neto, "Maturity Analysis of Protection Solutions for Power Systems Near Inverter-Based Resources," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024.
- [2] M. J. B. B. Davi, M. Oleskovicz, F. V. Lopes and D. C. Jorge, "Impacts of Inverter-Interfaced Wind Power Plants in the Phase-Selection and Directional Protection Functions," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 1, pp. 151-157, Jan. 2023, doi: 10.1109/TLA.2023.10015137.
- [3] F. V. Lopes, E. Leite Jr, G. Zat, A. Scheid, M. Davi, R. Reis, P. Godoy, N. Pierim, G. Justino, J. Souza, M. Oleskovicz, "Development of fault location functions in a real digital fault recorder: Computational strategies and validation." *Electric Power Systems Research*, 234, 110684, 2024.
- [4] J. Grainger, W. Stevenson, *Power System Analysis*, 1st Edition, McGraw Hill, Jan, 1994.
- [5] M. J.B.B. Davi, M. Oleskovicz, F. V. Lopes, "Study on IEEE 2800-2022 standard benefits for transmission line protection in the presence of inverter-based resources", *Electric Power Systems Research*, 2023.
- [6] IEEE standard for interconnection and interoperability of inverter-based resources (IBRs) interconnecting with associated transmission electric power systems, IEEE Std 2800-2022, 2022.
- [7] D. V. Coury, M. Oleskovicz, R. Giovanini, *Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. SEL/EESC/USP, 2007.
- [8] Costello, D., & Zimmerman, K. (2010, March). Determining the faulted phase. In *2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers* (pp. 1-20). IEEE.
- [9] Hooshyar A, El-Saadany EF, Sanaye-Pasand M. Fault Type Classification in Microgrids Including Photovoltaic DGs. *IEEE Trans on Smart Grid*. 2016;7(5):2218-29.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Felipe V. Lopes possui graduação, mestrado, doutorado e pós-doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande, concluídos em 2009, 2011, 2014 e 2018, respectivamente. É Senior Member do IEEE, Editor Associado da *IEEE Transactions on Power Delivery* e da *IEEE PES Engineering Letters*, é pesquisador CNPq/PQ-2 e membro do CE-B5 do CIGRE, sendo coordenador do grupo GT02 e secretário do B5.55. Trabalhou na Universidade de Brasília de 2014 a 2021 e, em 2021, assumiu carreira na Universidade Federal da Paraíba, onde é membro do Smart Grid Group e do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis. Tem formação com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, e atua principalmente nas áreas de: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 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 vasta 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 e diagnóstico de falta em sistemas com gerações baseadas em inversores.



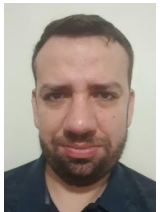
Raphael L. A. Reis possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), concluídos em 2013, 2015 e 2019, respectivamente. Em 2012, realizou intercâmbio em nível de graduação na University of Kentucky, EUA. É membro do Comitê de Estudos B5 do Cigré, onde atua como secretário do grupo GT-02. Atualmente é Professor da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) no Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (DEER). Tem experiência na área de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente em Localização de Falhas, Proteção de Sistemas Elétricos e Transitórios Eletromagnéticos.



Eduardo J. S. Leite Jr. nasceu em Maceió-AL, 1993. Recebeu o título de B.Sc. de graduação em engenharia da energia na Universidade de Brasília (UnB) em 2015, e os títulos de M.Sc. e D.Sc em engenharia elétrica pela UnB em 2016 e 2020, respectivamente. Atualmente, é pesquisador bolsista do Parque Tecnológico Itaipu, onde desenvolve tarefas relacionadas à programação de algoritmos voltados para localização de faltas em linhas de transmissão. Tem interesse em temas relacionados à proteção de sistemas elétricos e geração de energia elétrica.



Guilherme Zat possui graduação em Engenharia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica e computação pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE (2011). Atualmente é Engenheiro Eletricista da Itaipu Parquetec, atuando como coordenador do Centro de Gestão Energética, com foco principal 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).



Allan Scheid é cientista da Computação formado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) em 2012, com experiência em desenvolvimento de sistemas para medição e análise de sistemas elétricos de potência em tempo real e nas linguagens de programação C, C++, C# e Java.



Nicolas Pereira possui graduação em Engenharia de Computação pela Universidade Federal da Grande Dourados (2019) e especialização em Banco de Dados pela Unicesumar (2022), foi membro do Grupo de Pesquisa PONTE - CNPq - UFGD, atuou com projetos de extensão e iniciação científica. Atualmente atua como Profissional de TIC Pleno no Parque Tecnológico Itaipu Brasil.



Paulo Thiago de Godoy é graduado em engenharia elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2018). Mestrado em engenharia elétrica e computação pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2020). Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2024). Atua como engenheiro no Itaipu Parquetec, antiga Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil (FPTI-BR). Interessa-se por sistemas de distribuição e Microrredes.



Guilherme Louro Justino é natural de Goioerê Paraná, nascido em março de 1987. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2011). Atualmente é Engenheiro Eletricista no Centro de Competência em Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (GE.DT) do Itaipu Parquetec, antiga Fundação Parque Tecnológico Itaipu - Brasil (FPTI-BR), onde atua principalmente nas áreas de simulação em tempo real de sistemas elétricos de potência, sistemas de proteção, geração distribuída e microrredes.



Mário Oleskovicz possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 1995, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo - USP, Brasil, em 1997 e 2001, respectivamente. É professor associado na EESC/USP, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação em regime de dedicação integral à docência e à pesquisa, com orientação plena no programa de pós-graduação em engenharia elétrica. Atua na área de sistemas elétricos de potência (geração, transmissão, distribuição e microrredes), com ênfase nas subáreas de qualidade da energia elétrica e proteção digital.