

RODRIGO ROZENBLIT TIFERES

**Algoritmo de proteção piloto de linhas de
transmissão baseado em biweight midcorrelation**

São Paulo
2022

RODRIGO ROZENBLIT TIFERES

**Algoritmo de proteção piloto de linhas de
transmissão baseado em biweight midcorrelation**

Versão corrigida

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:

Sistemas de Potência

Orientador:

Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior

Co-orientador:

Prof. Dr. Eduardo Lorenzetti Pellini

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de dezembro de 2022

Assinatura do autor:

Rodrigo Tiferes

Assinatura do orientador:

Guilherme Manduca Jr

Catálogo-na-publicação

Tiferes, Rodrigo Rozenblit

Algoritmo de proteção piloto de linhas de transmissão baseado em biweight midcorrelation / R. R. Tiferes -- versão corr. -- São Paulo, 2022.
123 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Proteção de sistemas elétricos 2. Sistemas elétricos de potência
3. Linhas de transmissão de energia elétrica I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação
Elétricas II.t.

Aos meus pais.

Aos meus irmãos.

Aos meus avós e abuelos.

Aos meus primos e tios.

Aos meus amigos.

Agradecimentos

Aos meus pais Sandra e Dario, que sempre estiveram do meu lado, me apoiaram e são os maiores e melhores exemplos que eu tenho.

Aos meus irmãos André e Camila, que são meus melhores amigos, são pessoas maravilhosas e estão sempre comigo.

A mi abuela Rosa, que es la persona más fuerte e increíble que he conocido y a mi abuelo Natálio, por todo el apoyo, el ejemplo y todo lo que he aprendido contigo a lo largo de mi vida.

À minha avó Dilma, por ser sempre a pessoa maravilhosa que é e por tudo que ela contribuiu no meu desenvolvimento e aprendizado e ao meu avô Luiz (*in memoriam*), que toma conta de mim desde lá de cima.

Ao professor Giovanni, por todas as orientações, por ter acreditado em mim, me incentivado, ensinado e estado do meu lado desde o meu Projeto de Formatura e durante todo o desenvolvimento das nossas pesquisas.

Ao professor Eduardo Pellini, que desde que eu entrei na Poli, me inspirou a ir para a ênfase de engenharia de energia e automação elétricas e por toda a ajuda na elaboração da parte experimental deste trabalho.

A todos os demais professores que contribuíram com a minha formação, em especial a professora Milana Lima dos Santos e o professor Silvio Giuseppe Di Santo.

Aos meus primos, tios, familiares, amigos e colegas.

À ISA CTEEP, que por meio do projeto de pesquisa e desenvolvimento ANEEL 00068-0049/2020, financiou o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

TIFERES, R. R. **Algoritmo de proteção piloto de linhas de transmissão baseado em biweight midcorrelation**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2022.

Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento e a implementação de um algoritmo de proteção piloto de linhas de transmissão de energia elétrica cuja detecção de faltas é baseada em coeficientes de *biweight midcorrelation* entre as correntes dos terminais.

O algoritmo apresentado foi primeiramente comparado com outras soluções baseadas em correlações encontradas na literatura mediante simulações com sinais de falta gerados no programa de transitórios eletromagnéticos *Alternative Transients Program* (ATP). Os resultados indicam que o método proposto pode detectar faltas de diferentes tipos e com diversas resistências na linha protegida com rapidez de milissegundos e é capaz de diferenciar faltas internas de faltas externas com robustez, conforme evidenciado principalmente em casos sob as condições desafiadoras de saturação dos transformadores de corrente, medidas ruidosas e desalinhamento entre as amostras de corrente dos terminais.

Em complemento, foram analisados os efeitos de variações na frequência de amostragem e na resistência de falta nas respostas do método. Além disso, a solução proposta teve sua performance avaliada em um caso contendo oscilação de potência em um sistema de máquina síncrona (MS) contra barra infinita, em casos de falta simulados em linhas de transmissão com características diversas e em um caso de faltas simultâneas. Também, foram investigadas as influências das condições de *weak infeed* e *outfeed*, da componente unidirecional da corrente e da modelagem da linha protegida nas respostas do algoritmo.

Em seguida, o algoritmo foi implementado e validado experimentalmente por meio de testes em tempo real conduzidos com um esquema de *hardware-in-the-loop* (HiL) composto por uma caixa de testes Omicron CMC 256 e um *intelligent electronic device* (IED) baseado na norma IEC 61850, que embarca a lógica do método. Além dos sinais de falta provenientes das simulações realizadas com o ATP, utilizou-se, também, medições de correntes registradas por equipamentos de campo durante oito faltas reais ocorridas em quatro linhas de transmissão existentes do Sistema Interligado Nacional nos testes experimentais do método apresentado.

Todos os resultados e análises realizadas indicam que o algoritmo proposto nesta pesquisa constitui uma alternativa que, através de comparações com técnicas similares, se mostrou eficiente e robusta para a proteção piloto de linhas de transmissão, que é uma técnica que vem sendo cada vez mais utilizada em subestações de energia modernas.

Palavras-Chave – *Biweight midcorrelation*, proteção piloto, correlação estatística, linha de transmissão, detecção de faltas, algoritmo, desenvolvimento, implementação.

Abstract

TIFERES, R. R. **Biweight midcorrelation based transmission line pilot protection algorithm**. Thesis (Ph.D. in Electrical Engineering) - Polytechnic School, University of São Paulo, 2022.

This research presents developing and implementing a pilot protection algorithm for power transmission lines whose fault detection is based on biweight midcorrelation coefficients between the line terminals' currents.

The presented algorithm was first compared with other solutions based on correlations found in the literature through simulations with fault signals generated in the electromagnetic transient program Alternative Transients Program (ATP). The results indicate that the proposed method can rapidly detect faults of different types and resistances in the protected line within milliseconds and can differentiate internal from external faults with robustness, as evidenced mainly in cases under the challenging conditions of saturation of the current transformers, noisy measurements, and misalignment between the protected line's terminals.

In addition, the effects of variations in the sampling frequency and fault resistance on the method responses were analyzed. Furthermore, the proposed solution had its performance evaluated in a case containing power oscillation in a synchronous generator versus an infinite bus system, in internal fault cases on transmission lines with different characteristics, and in a scenario regarding simultaneous faults. Besides, the influences of the weak infeed and outfeed conditions, the fault currents' unidirectional component, and the protected line's modeling in the algorithm's behavior were also investigated.

Then, the algorithm was experimentally implemented and validated through real-time tests conducted with a hardware-in-the-loop (HiL) arrangement composed of an Omicron CMC 256 test set and an IEC 61850-based custom intelligent electronic device (IED), which embeds the method's logic. In addition to the simulated faults' current signals, field measurements recorded during eight actual faults in four existing transmission lines were also used in the algorithm's real-time experiments.

All obtained results and performed analyses indicate that the algorithm proposed in this research constitutes an alternative that, through comparisons with similar techniques, proved efficient and robust for the pilot protection of transmission lines, a technique that has been increasingly used in modern power substations.

Keywords – Biweight midcorrelation, pilot protection, statistical correlation, transmission line, fault detection, algorithm, development, implementation.

Lista de figuras

3.1	Topologia de proteção de LT necessária para a utilização do algoritmo . . .	39
3.2	Correntes dos terminais e coeficientes de BWMC ao longo do tempo de uma fase envolvida em um caso de falta interna exemplo	46
3.3	Lógica de <i>trip</i> do algoritmo proposto	48
4.1	Diagrama unifilar do sistema de 440 [kV] modelado	51
4.2	Disposição geométrica e características das torres do sistema	52
4.3	Fotografia de uma das torres pertencentes à rede modelada	53
4.4	Correntes nos terminais e coeficientes de BWMC da fase A (tamanhos de QC, MC e CC) ao longo do tempo durante caso de falta AN interna	59
4.5	Correntes nos terminais (fase B) e coeficientes de BWMC, correlação de Pearson e similaridade estrutural (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta externa com saturação de TC	62
4.6	Correntes nos terminais (fase C) e coeficientes de BWMC, correlação de Spearman e correlação de Kendall (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta externa com ruídos de 20 [dB] nos sinais	63
4.7	Correntes nos terminais (fase C) e coeficientes de BWMC (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta externa com desalinhamento, em que os outros algoritmos apresentaram falha de segurança	64
4.8	Correntes nos terminais (fase B) e coeficientes de BWMC e de similaridade de cosseno (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta interna com resistência de 1000 [Ω] e defasagem de 76° entre os sinais . . .	65
4.9	Correntes nos terminais (fase C) e coeficientes de BWMC (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta interna com resistência de 1000 [Ω] e defasagem de 150° entre as correntes dos terminais	67
4.10	Comportamento dos coeficientes de BWMC calculados com janelas de MC em função das fases δ_L e δ_R de dois sinais senoidais $i_L(t)$ e $i_R(t)$	68

4.11	Diagrama ilustrando as amostragens, os instantes de aquisição, chegada das amostras, falta e <i>trip</i> , valores amostrados, atrasos de comunicação e tempo de processamento do algoritmo (MC) para caso exemplo	71
4.12	Tempos de <i>trip</i> do algoritmo em função da frequência de amostragem	73
4.13	Tempos de <i>trip</i> do algoritmo em função da resistência de falta	74
4.14	Sistema elétrico de MS contra barra infinita considerado para caso de faltas e oscilação de potência	76
4.15	Ângulo do rotor da MS e coeficientes de BWMC (calculados com MC) dos dois circuitos (fase C) ao longo do tempo	78
4.16	Histograma dos tempos de <i>trip</i> de todas as fases em todos os casos (vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de um quarto de ciclo)	84
4.17	Histograma dos tempos de <i>trip</i> de todas as fases em todos os casos (vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de meio ciclo)	84
4.18	Histograma dos tempos de <i>trip</i> de todas as fases em todos os casos (vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de um ciclo completo)	85
4.19	Correntes locais, remotas e coeficientes de BWMC (meio ciclo: $N = 16$) nas três fases para a falta BCN considerada (1,92 [kHz])	86
4.20	Correntes locais, remotas e coeficientes de BWMC (meio ciclo: $N = 32$) nas três fases para a falta AN considerada (3,84 [kHz])	87
4.21	Correntes locais, remotas e coeficientes de BWMC (meio ciclo: $N = 40$) nas três fases para a falta ABC considerada (4,80 [kHz])	88
4.22	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para o caso de faltas simultâneas no sistema de 440 [kV]	89
4.23	Sistema de 500 [kV] com terminal local (Zona Oeste) de baixa potência de curto-circuito (<i>weak infeed</i>)	91
4.24	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta interna no sistema de 500 [kV] com <i>weak infeed</i>	92
4.25	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 16$) para falta interna na linha de 765 [kV] com <i>outfeed</i>	94

4.26	Correntes de sequência zero nos terminais e coeficientes de BWMC (MC: N = 16) para falta interna na linha de 765 [kV] com <i>outfeed</i>	95
4.27	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: N = 32) para falta interna no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional mínima	98
4.28	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: N = 32) para falta interna no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional máxima	98
4.29	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: N = 32) para falta externa no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional mínima	99
4.30	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: N = 32) para falta externa no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional máxima	99
4.31	Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: N = 32) para falta interna no sistema de 500 [kV] considerando-se os modelos de linha de parâmetros variantes e invariantes com a frequência	101
5.1	Esquema de HiL utilizado para os testes experimentais do algoritmo	103
5.2	Diagrama ilustrativo do arranjo de HiL utilizado para os testes	104
5.3	Correntes dos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (calculados com MC) ao longo do tempo para a falta 2.2, tanto do teste em tempo real como da simulação desse caso	109
A.1	Implementação da rotina de cálculo de medianas em C	118

Lista de tabelas

4.1	Comprimentos das linhas do sistema modelado	52
4.2	Tensão dos equivalentes em cada condição de carga	54
4.3	Tempos de <i>trip</i> médios e máximos, em [ms], de cada algoritmo	58
4.4	Tempos de <i>trip</i> do algoritmo proposto, em [ms], para cada tipo de falta . .	59
4.5	Número de falhas de segurança para cada algoritmo e condição crítica . . .	61
4.6	Tempos de <i>trip</i> do algoritmo proposto, em [ms], em cada condição crítica .	68
4.7	Características das linhas pertencentes ao bloco 1	79
4.8	Potências de curto-circuito, em [GVA], nos terminais das LTs do bloco 1 .	79
4.9	Tempos de <i>trip</i> , em [ms], para as linhas do bloco 1 (1,92 [kHz])	80
4.10	Características das linhas pertencentes ao bloco 2	81
4.11	Parâmetros de sequência positiva das linhas do bloco 2	81
4.12	Parâmetros de sequência zero das linhas do bloco 2	81
4.13	Potências de curto-circuito, em [GVA], nos terminais das LTs do bloco 2 .	81
4.14	Tensão nos terminais de cada linha do bloco 2	82
4.15	Tempos de <i>trip</i> , em [ms], para as linhas do bloco 2 (1,92 [kHz])	83
4.16	Tempos de <i>trip</i> , em [ms], para as linhas do bloco 2 (3,84 [kHz])	83
4.17	Tempos de <i>trip</i> , em [ms], para as linhas do bloco 2 (4,80 [kHz])	84
5.1	Características dos casos de falta reais	107
5.2	Tempos de <i>trip</i> do algoritmo proposto, em [ms], para cada falta, nas simu- lações e nos testes em tempo real	108
A.1	Complexidades computacionais da rotina desenvolvida e de métodos con- vencionais consolidados de ordenação	116
A.2	Resultados da rotina de medianas para os valores exemplo	117

Lista de símbolos

L	Terminal local da linha protegida	
R	Terminal remoto da linha protegida	
\mathbb{I}_L	Vetor de amostras de corrente do terminal L	
\mathbb{I}_R	Vetor de amostras de corrente do terminal R	
N	Número de amostras que compõem os vetores	
k	Identificador das posições das amostras	
$i_{L,k}$	k-ésima amostra do vetor \mathbb{I}_L	[A]
$i_{R,k}$	k-ésima amostra do vetor \mathbb{I}_R	[A]
$I_L(t)$	Sinal de corrente primária no terminal L	[A]
$I_R(t)$	Sinal de corrente primária no terminal R	[A]
$i_L(t)$	Sinal de corrente secundária no terminal L	[A]
$i_R(t)$	Sinal de corrente secundária no terminal R	[A]
T_a	Período de amostragem	[s]
f	Frequência do sistema elétrico	[Hz]
f_a	Frequência de amostragem	[Hz]
n	Número da amostragem	
$t_{L,n}$	Instante da n-ésima amostragem no terminal L	[s]
$t_{R,n}$	Instante da n-ésima amostragem no terminal R	[s]
$i_L[n]$	n-ésimo valor de corrente amostrado no terminal L	[A]
$i_R[n]$	n-ésimo valor de corrente amostrado no terminal R	[A]
p	Ponteiro para as posições das amostras mais recentes	
\mathbb{I}_{op}	Vetor de amostras de corrente diferencial	
$i_{op,k}$	k-ésima amostra do vetor \mathbb{I}_{op}	[A]
i_D	Valor máximo do vetor \mathbb{I}_{op}	[A]
i_M	Corrente diferencial mínima	[A]
$S_{1\phi}$	Potência de curto-circuito monofásico	[VA]
$S_{3\phi}$	Potência de curto-circuito trifásico	[VA]
Δt_{Canal}	Atraso de comunicação do canal	[s]
Δt_{CPU}	Tempo de processamento do algoritmo	[s]
δ	Ângulo do rotor da MS	[graus]

Lista de abreviaturas

ACSR	<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>
ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
ANAREDE	Análise de Redes em Regime Permanente
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BWMC	<i>Biweight midcorrelation</i>
CC	Ciclo completo
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CMPD	Correlação mediana de peso duplo
COMTRADE	<i>Common Format for Transient Data Exchange</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DJ	Disjuntor
FLOPS	<i>Floating point operations</i>
GOOSE	<i>Generic object oriented substation event</i>
HiL	<i>Hardware-in-the-loop</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LPF	<i>L • PROT Framework</i>
LT	Linha de transmissão
MS	Máquina síncrona
MC	Meio ciclo
MQ	Mínimos quadrados
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPGW	<i>Optical ground wire</i>
OPLAT	Ondas portadoras em linhas de alta tensão
PC	<i>Personal computer</i>

PLC	<i>Power line carrier</i>
QC	Quarto de ciclo
RAM	<i>Random access memory</i>
RB	Rede Básica
RSR	Relação sinal-ruído
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
SV	<i>Sampled values</i>
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
TDF	Transformada discreta de Fourier

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Considerações iniciais	16
1.2	Proteção de linhas de transmissão	17
1.3	Proteção de linha por canal piloto	19
1.4	Motivação e objetivos	20
1.5	Apresentação do trabalho	22
2	Revisão da literatura	24
2.1	Proteção piloto de linha baseada em fasores	24
2.2	Proteção piloto de linha baseada em propagação de ondas viajantes	27
2.3	Proteção piloto de linha baseada em energia	28
2.4	Proteção piloto de linha baseada em otimização	29
2.5	Proteção piloto de linha baseada em inferência Bayesiana	29
2.6	Proteção piloto de linha baseada em distância entre os vetores de corrente	33
2.7	Proteção piloto de linha baseada em correlação e similaridade	34
2.8	Contribuição desta pesquisa	37
3	Metodologia	39
3.1	Topologia de proteção requerida pelo algoritmo	39
3.2	Cálculo da BWMC entre as correntes terminais	41
3.3	Lógica de detecção de faltas	45
4	Simulações e resultados	50
4.1	Descrição do sistema e das faltas simuladas	51

4.2	Velocidade de detecção de faltas internas	57
4.3	Condições críticas	60
4.4	Atrasos de comunicação e processamento	69
4.5	Influência da frequência de amostragem	72
4.6	Influência da resistência de falta	74
4.7	Oscilação de potência	75
4.8	Simulações adicionais em linhas diversas	78
4.8.1	Bloco 1	78
4.8.2	Bloco 2	80
4.9	Faltas simultâneas	89
4.10	Faltas em sistema com baixa potência de curto-circuito (<i>weak infeed</i>) . . .	90
4.11	Falta interna com <i>outfeed</i>	93
4.12	Influência da componente unidirecional	96
4.12.1	Faltas internas	97
4.12.2	Faltas externas	98
4.13	Influência da modelagem das linhas	100
5	Implementação e testes em tempo real	102
5.1	Descrição do esquema experimental de testes	102
5.2	Implementação e tempos de processamento	104
5.3	Testes com sinais de faltas simuladas	105
5.4	Testes com sinais de faltas reais	107
6	Conclusões	112
	Apêndice A – Rotina de cálculo de medianas	114
	Referências	119

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Os sistemas elétricos de potência são conjuntos de circuitos, equipamentos e instalações que englobam a geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica. Esses sistemas são responsáveis por fornecer energia de maneira instantânea e dentro de padrões de qualidade para os consumidores, e podem apresentar, como no caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro, dimensões continentais.

As linhas de transmissão (LTs) são os componentes fundamentais dos sistemas elétricos, uma vez que interligam os pontos de geração aos de consumo e transmitem entre eles imensas quantidades de energia, com baixos índices de perda.

Em sistemas como o SIN, no qual predomina a geração hidrelétrica (mais de 60% da matriz energética, de acordo com (ONS, 2022)), as localidades de geração encontram-se em sua maioria afastadas dos grandes centros consumidores. Assim, uma parcela expressiva das LTs pertencentes à Rede Básica (RB), que são as de tensão maior ou igual a 230 [kV], possuem comprimentos da ordem de grandeza de centenas de quilômetros. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a extensão total da malha de transmissão da RB em 2021 era de aproximadamente 170 mil quilômetros, enquanto a extensão total da malha da RB prevista para o ano de 2026 supera os 200 mil quilômetros (ONS, 2022).

As LTs da RB, sobretudo as aéreas e com comprimentos mais elevados, estão significativamente mais sujeitas à ocorrência de faltas, causadas na maioria dos casos por queimadas ou condições meteorológicas adversas, do que subestações (SEs) e instalações não-pertencentes à RB. Segundo (ONS, 2022), no ano de 2021, foram registradas 2374 ocorrências de falta em LTs da RB, o que corresponde a mais de 70% de todos os casos de perturbação ocorridos no SIN naquele ano.

Dessa forma, é imprescindível que, na ocorrência de eventos de falta, que podem comprometer a operação normal e segura de um sistema elétrico de potência, os sistemas de proteção das LTs e equipamentos tomem ações corretivas de forma rápida e precisa para reduzir impactos como variações de frequência e perda de estabilidade eletromecânica.

1.2 Proteção de linhas de transmissão

Como as LTs são os componentes dos sistemas elétricos nos quais ocorre a maioria dos eventos de falta, a proteção de LTs vem sendo objeto de grande interesse tanto acadêmico como industrial desde a concepção das redes elétricas modernas e dos primeiros relés de proteção, no final do século XIX e no início do século XX.

As primeiras técnicas de proteção de LTs desenvolvidas por pesquisadores e utilizadas em relés de proteção comerciais eram baseadas em dispositivos eletromecânicos, fundamentados em movimentos mecânicos originados por interações eletromagnéticas. Com a evolução das tecnologias relacionadas à infraestrutura de proteção, com destaque ao desenvolvimento dos relés estáticos baseados em eletrônica analógica na década de 70 e principalmente dos relés numéricos baseados em microprocessadores na década de 80, os equipamentos atualmente disponíveis no mercado, conhecidos por dispositivos eletrônicos inteligentes (em inglês, *intelligent electronic devices* (IEDs)), são capazes de executar distintas rotinas de proteção, controle e automação (VIANNA, 2021).

Assim, as funções para monitorar e detectar faltas em LTs pensadas inicialmente foram sendo aprimoradas com os avanços tecnológicos de maneira que, nos dias atuais, o desenvolvimento de novas soluções de proteção para serem implementadas nos IEDs modernos constitui uma linha de pesquisa designada para aumentar a confiabilidade, rapidez, segurança e confiabilidade dos sistemas de proteção, e conseqüentemente, dos sistemas elétricos de maneira geral.

Uma das técnicas de proteção de LTs mais empregada e conseqüentemente discutida em diversas referências bibliográficas é a função de distância (21 da norma ANSI (IEEE, 2008)). Essa abordagem é essencialmente baseada em estimar, a partir dos valores de tensão e corrente coletados pela instrumentação da proteção em campo, a impedância aparente vista pelo relé, que tende a ser proporcional ao comprimento total da linha protegida (VIANNA; MANASSERO JR., 2022).

Os métodos que implementam a função de proteção de distância para LTs são eficientes para detectar em aproximadamente um ciclo faltas com baixas resistências no interior da zona protegida. Além disso, algoritmos desse tipo geralmente não requerem amostragens sincronizadas e trocas de valores amostrados entre os terminais da linha, o que é vantajoso sob os pontos de vista de implementação e infraestrutura. No entanto, por não serem unitárias (capazes de detectar faltas instantaneamente em todo o comprimento da linha), soluções de proteção de distância podem ser afetadas adversamente por faltas

além do alcance da primeira zona, uma vez em que os atrasos de coordenação atrelados às demais zonas podem tornar o comando de abertura do disjuntor (*trip*) excessivamente lento e provocar problemas de estabilidade eletromecânica e desligamentos em cascata (ANDERSON, 1998). Assim, um canal de comunicação entre os terminais da linha protegida pode ser empregado para que, com um arranjo de teleproteção (CIGRE, 2001) em conjunto com os IEDs de ambas as terminações da linha, os tempos de eliminação das faltas sejam próximos aos da primeira zona independentemente da localização da falta.

Tipicamente, a teleproteção (85 da norma ANSI (IEEE, 2008)) é implementada por meio de esquemas de ondas portadoras em linhas de alta tensão (OPLAT), em inglês *power line carrier* (PLC), cabos guarda preenchidos por fibra ótica, em inglês *optic ground wires* (OPGW) ou enlaces de micro-ondas. Entretanto, mesmo com os esquemas de teleproteção, métodos de proteção de distância podem apresentar falhas de operação (não atuação) ou detecção de falta criticamente lenta em casos de faltas de alta impedância, ser afetados pelo comportamento dinâmico de transformadores de potencial (TPs) capacitivos em faltas próximas aos disjuntores (DJs) e apresentar falhas de segurança (atuação indevida) ou operação (não atuação) em casos envolvendo oscilação de potência (TIFERES; MANASSERO JR., 2022).

Além disso, esses algoritmos possuem a desvantagem de necessitar os valores das impedâncias da LT protegida, que variam com parâmetros externos tais como a temperatura dos condutores (CHECCHI et al., 2011). Vale comentar também que as impedâncias de sequência zero, necessárias para a estimação dos elementos de fase-terra dos algoritmos de proteção de distância, têm seus valores influenciados significativamente pelas características do solo (DAS et al., 2019). Assim, pode-se utilizar a comunicação entre os terminais da LT para desenvolver outras abordagens e soluções de proteção que lidem com as adversidades mencionadas (sobretudo a comunicação por OPGW, que pode ser vantajosa ante a por OPLAT/PLC pois não é necessariamente interrompida durante faltas, não é afetada por interferências eletromagnéticas e não requer a utilização de bobinas de bloqueio).

As inovações tecnológicas desenvolvidas desde o início do século XXI relacionadas às redes elétricas modernas e inteligentes, às subestações automatizadas e digitais, às redes de comunicação e aos protocolos e métodos de sincronismo, em conjunto com normas abertas e padronizadas como a IEC 61850 (ALI et al., 2018; CIGRE, 2013), permitem com que sejam propostos e implementados algoritmos de proteção que utilizem sincronização e comunicação em tempo real entre os terminais da LT. Nesse contexto, algoritmos que utilizam estes dois atributos (comunicação e sincronização entre terminais em tempo real) são classificados como algoritmos de proteção de linha por canal piloto.

1.3 Proteção de linha por canal piloto

Conforme mencionado na seção anterior, as características principais dos algoritmos de proteção de linha por canal piloto são (IEEE, 2015; CIGRE, 2001):

- comunicação entre os IEDs dos terminais; e
- sincronização entre a aquisição de amostras dos sinais analógicos em cada terminal.

A comunicação entre os IEDs dos terminais é conduzida por um canal de comunicações (também conhecido por canal piloto) que, em sistemas mais modernos, é implantado geralmente a partir de arranjos de fibra ótica em cabos OPGW.

A sincronização entre a aquisição de amostras nos terminais, por sua vez, é normalmente implementada por meio de relógios GPS (CIGRE, 2001) e/ou algoritmos de pingue-pongue (IEEE, 2015). A sincronização têm por objetivo garantir, idealmente, que:

- os instantes de aquisição das grandezas analógicas provenientes dos transformadores de instrumentação sejam virtualmente os mesmos nos dois terminais (as diferenças entre os instantes de amostragem sejam sempre as menores possíveis);
- cada amostra contenha, além do valor instantâneo das grandezas analógicas medidas, sua estampa de tempo de aquisição correspondente; e
- os IEDs calculem os atrasos de comunicação do canal e alinhem os valores amostrados corretamente no tempo.

Convém comentar que, diferentemente de um arranjo de proteção de distância com teleproteção, em um sistema de proteção piloto de linha não é necessário que o algoritmo seja executado em tempo real nos dois terminais (embora isso seja recomendável, caso os IEDs de uma das terminações da linha falhem). Isso ocorre pois os métodos de proteção piloto utilizam os mesmos ajustes e as mesmas medições, provenientes dos terminais. Ainda assim, tipicamente, os dois terminais, local (L) e remoto (R), realizam o intercâmbio dos valores amostrados para a outra ponta, enviando suas amostras mais recentes pelo enlace de comunicações, e executam o mesmo algoritmo de proteção de forma duplicada.

Vale mencionar também que, pelo canal de comunicação, além de valores amostrados, fluem informações referentes a comandos de manobra dos DJs, estados operativos dos mesmos e dados de sincronismo, entre outras.

A comunicação, por sua vez, é implementada ou com protocolos abertos tais como os recomendados pela norma IEC 61850 (ALI et al., 2018; CIGRE, 2013) ou com protocolos proprietários dos fabricantes dos IEDs e da instrumentação do sistema de proteção.

Assim, é possível observar que os algoritmos de proteção piloto requerem uma infraestrutura consideravelmente mais complexa do que os esquemas de proteção de distância. Entretanto, as soluções de proteção por canal piloto podem ser vantajosas pois são capazes de detectar faltas internas com velocidade maior, de maneira segura e confiável, o que é crucial sobretudo para linhas de RB, que possuem níveis de alta e extra alta tensão (ANDERSON, 1998). Em complemento, os algoritmos de proteção piloto são unitários (protegem a linha em seu comprimento integral, sem necessidade de atrasos intencionais de coordenação), não são afetados adversamente por oscilações de potência, são capazes geralmente de detectar com precisão faltas de alta impedância e tipicamente não requerem informações relativas aos parâmetros da LT a ser protegida. Além disso, todas as tecnologias requeridas por soluções de proteção de LT por canal piloto já encontram-se consolidadas no mercado há pelo menos duas décadas (CIGRE, 2001).

Vale destacar também que, de acordo com (CIGRE, 2001), a utilização de canais de comunicação redundantes (para servir de *backup* em casos com falhas no canal principal) é recomendada para garantir maior confiabilidade. Também, segundo o submódulo 2.11 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2021), em linhas protegidas por algoritmos de proteção piloto/diferencial de linha 87L (IEEE, 2008), funções de distância e sobrecorrente também devem ser utilizadas como proteção de retaguarda. Assim, em eventuais casos críticos em que todos os meios de comunicação entre os terminais sejam corrompidos, a linha continua protegida, mesmo que por algoritmos cuja detecções de falta são tipicamente mais lentas.

1.4 Motivação e objetivos

Tendo em vista a rapidez e a eficiência dos algoritmos de proteção piloto para a proteção de LTs, de acordo com as ponderações desenvolvidas na seção anterior, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho reside no desenvolvimento e na proposta de um novo método de proteção de linha por canal piloto que constitui uma alternativa:

- capaz de detectar quaisquer faltas internas à LT protegida com precisão, rapidez, segurança, confiabilidade e robustez;
- capaz de diferenciar adequadamente faltas internas de faltas externas, mesmo nas condições mais críticas que podem comprometer o desempenho de outros algoritmos;

- que possui implementação simples e não requer *hardware* com capacidade de processamento maior do que os disponíveis atualmente no mercado;
- que não requer o conhecimento acerca de quaisquer parâmetros da LT protegida;
- que pode ser aplicado a LTs de corrente alternada com diversos comprimentos e níveis de tensão;
- que não requer quaisquer melhorias nos arranjos e na infraestrutura de proteção por canal piloto convencionais comerciais; e
- que trabalha apenas com valores amostrados de corrente, sem a necessidade de valores amostrados de tensão.

Os objetivos do presente trabalho são, portanto, apresentar e discutir o desenvolvimento, a implementação, a performance e a validação experimental do algoritmo de proteção piloto proposto nesta pesquisa, que baseia-se essencialmente nos coeficientes de *biweight midcorrelation* (BWMC) calculados entre os vetores contendo valores amostrados dos terminais da LT protegida para a detecção de faltas internas.

A tradução do termo representado pelo acrônimo BWMC para o português considerada como mais precisa, levando em consideração o contexto desta pesquisa, seria “correlação mediana de peso duplo” (CMPD). Entretanto, como não foi encontrada uma tradução oficial para a BWMC em português, optou-se por utilizar, no título e no decorrer deste trabalho, o termo original em língua inglesa, em detrimento do termo CMPD.

A BWMC é uma medida de correlação e similaridade entre dois conjuntos de dados, que, ao contrário das medidas de correlação utilizadas nos métodos levantados na pesquisa bibliográfica, as quais utilizam diretamente valores amostrados, postos ou valores de média e variância, é baseada essencialmente em operações envolvendo as medianas dos conjuntos de dados avaliados, o que confere robustez maior contra *outliers* tais como ruídos aleatórios e medidas inconsistentes.

Na ciência de dados moderna, a BWMC tem sido cada vez mais envolvida em aplicações envolvendo teste de hipóteses baseadas em medidas de correlação robustas, conforme descrito em (WILCOX, 2017).

O algoritmo apresentado foi primeiramente testado e comparado com outras soluções baseadas em correlação e similaridade encontradas na literatura, por meio de dados resultantes de diversas simulações de falta realizadas em uma rede elétrica existente do SIN, que foi modelada no *Alternative Transients Program* (ATP).

As simulações consideraram faltas de diferentes tipos, resistências, pontos de aplicação, condições de carga e instantes de início. Além disso, foram consideradas também as condições tipicamente críticas para algoritmos de proteção piloto de saturação de transformadores de corrente (TCs), sinais ruidosos com baixa relação sinal-ruído (RSR) e desalinamento de amostras entre terminais. Além disso, os efeitos de variações na frequência de amostragem e na resistência da falta no algoritmo também foram analisados.

O método apresentado foi considerado também em uma condição contendo oscilação de potência em um sistema elétrico de máquina síncrona (MS) contra barra infinita, em faltas internas em linhas diversas e em um caso com faltas simultâneas. Em complemento, foram analisadas as influências das condições de *weak infeed* e de *outfeed*, da componente unidirecional das correntes de falta e da modelagem da linha protegida nas respostas do algoritmo BWMC proposto.

Todos os resultados das simulações realizadas indicam que o método proposto é capaz de detectar quaisquer faltas internas à LT protegida com rapidez e precisão e de diferenciar faltas internas de externas com robustez maior para não apresentar falhas de segurança nas condições críticas em comparação com as demais alternativas consideradas, o que constitui a principal vantagem do algoritmo apresentado neste trabalho.

Após a fase da pesquisa envolvendo as simulações, o algoritmo proposto foi implementado no sistema operacional de um IED customizado baseado nos protocolos da norma IEC 61850 e testado em tempo real com uma caixa de testes Omicron CMC 256. Os testes realizados consideraram tanto os sinais das correntes de faltas simuladas no ATP como sinais registrados pela instrumentação de campo durante oito eventos de falta reais em linhas existentes do SIN.

Os resultados dos testes corroboram os obtidos nas simulações e demonstram que a solução apresentada e discutida neste trabalho de fato configura uma alternativa para a proteção de LTs por canal piloto efetiva, rápida, segura, confiável e robusta, que pode ser aplicada utilizando-se *hardware* e infraestrutura de proteção convencionais.

1.5 Apresentação do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em capítulos, cujos conteúdos são:

- 1. *Introdução*: apresentação das considerações iniciais, dos conceitos básicos sobre proteção de LTs e proteção piloto, da motivação e dos objetivos deste trabalho;

- 2. *Revisão da literatura*: apresentação das principais linhas de pesquisa que compõem o estado da arte de proteção piloto de LTs, de considerações a respeito das abordagens existentes e da contribuição desta pesquisa;
- 3. *Metodologia*: descrição da topologia de proteção piloto necessária para aplicação do método proposto, apresentação da formulação matemática associada com a correlação BWMC utilizada no algoritmo e explicação da lógica de *trip* da solução de proteção apresentada;
- 4. *Simulações e resultados*: descrição do principal sistema elétrico considerado nas simulações e dos casos de falta, análises de velocidade da proteção proposta (tempos de *trip*), análises de falhas e robustez (*security* e *dependability*) do método apresentado, comparações com outras abordagens encontradas na bibliografia, análises dos efeitos de variações na frequência de amostragem e na resistência de falta no algoritmo, simulação do método em sistema com oscilação de potência, em faltas internas em LTs diversas e em caso com faltas simultâneas e análises considerando as influências das condições de *weak infeed* e *outfeed*, da componente unidirecional amortecida e da modelagem da linha nas respostas do algoritmo;
- 5. *Implementação e testes*: apresentação do arranjo de *hardware-in-the-loop* (HiL) considerado para a realização dos testes em tempo real, discussão acerca da implementação do algoritmo proposto e de seus requisitos computacionais (tempos de processamento) e apresentação dos resultados obtidos (tanto com as faltas simuladas como com as faltas reais), considerando comparações entre as simulações e os testes experimentais conduzidos em tempo real;
- 6. *Conclusões*: apresentação das conclusões e das considerações finais sobre a pesquisa realizada;
- Apêndice A. *Rotina de cálculo de medianas*: descrição da rotina computacional de cálculo de medianas desenvolvida nesta pesquisa, utilizada para os cálculos de BWMC do algoritmo proposto; e
- *Referências*: apresentação das referências bibliográficas consultadas durante a elaboração deste trabalho.

2 Revisão da literatura

Este capítulo tem por objetivos apresentar as principais linhas de pesquisa que compõem o estado da arte de proteção piloto de LTs e discutir a contribuição do algoritmo apresentado neste trabalho.

Para tanto, considere que \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R são respectivamente vetores contendo amostras das correntes dos terminais local (L) e remoto (R) da LT protegida. Cada vetor é composto por N valores amostrados de corrente, alojados nas posições representadas genericamente por $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, onde o contador de posições k varia entre 1 e N (não necessariamente em ordem temporal, conforme explicado mais adiante). A representação dos vetores de corrente com suas amostras é dada conforme as equações (2.1) e (2.2).

$$\mathbb{I}_L = \{i_{L,1} \cdots i_{L,k} \cdots i_{L,N}\} \quad (2.1)$$

$$\mathbb{I}_R = \{i_{R,1} \cdots i_{R,k} \cdots i_{R,N}\} \quad (2.2)$$

Vale comentar que, em LTs polifásicas, cada fase tem seus próprios vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , uma vez que algoritmos de proteção de linha por canal piloto são naturalmente segregados por fase, o que permite aberturas monopolares.

2.1 Proteção piloto de linha baseada em fasores

A maioria dos algoritmos de proteção embarcados em IEDs comerciais, independentemente da função, utilizam fasores de tensão e/ou corrente (HOROWITZ; PHADKE, 2014). Embora existam diferentes técnicas de estimação de fasores (IBARRA et al., 2022), com soluções baseadas em ferramentas como por exemplo transformadas *wavelet* (CHAUHAN et al., 2018), filtros de Kalman (GIRGIS; MAKRAM, 1988), formulações matemáticas de mínimos quadrados (MQ) (LIU et al., 2019), transformadas Clarke (ZHAN et al., 2018) e *phaselets* (JIN et al., 2018), a abordagem mais consolidada e utilizada, por conta da precisão dos resultados e aspectos de implementação e carga computacional (ZHANG et al., 2019), é a transformada discreta de Fourier (TDF), tanto a de meio ciclo (MC) como a de um ciclo completo (CC), na frequência fundamental da rede elétrica.

Nesse contexto, as TDFs de CC (mais utilizadas do que as de MC, uma vez que são capazes de filtrar harmônicas pares) das amostras de \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , que resultam nos respectivos fasores \dot{I}_L e \dot{I}_R na frequência fundamental f , considerando que as amostras foram coletadas em intervalos de amostragem constantes e iguais a T_a , são dadas conforme as equações (2.3) e (2.4) (IBARRA et al., 2022).

$$\dot{I}_L = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N i_{L,k} \cdot \{\cos[2\pi f \cdot T_a \cdot (k-1)] + j \cdot \text{sen}[2\pi f \cdot T_a \cdot (k-1)]\} \quad (2.3)$$

$$\dot{I}_R = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N i_{R,k} \cdot \{\cos[2\pi f \cdot T_a \cdot (k-1)] + j \cdot \text{sen}[2\pi f \cdot T_a \cdot (k-1)]\} \quad (2.4)$$

A abordagem mais comum baseada em fasores empregada em algoritmos de proteção piloto de LTs, e também em métodos para proteger elementos de SEs como transformadores de potência (SALEH; OZKOP, 2021) e barramentos (RISTANOVIC et al., 2016), é a proteção diferencial (ZIEGLER, 2012), cujo número da norma (IEEE, 2008) é 87.

Os algoritmos baseados na abordagem diferencial geralmente utilizam duas grandezas calculadas a partir dos fasores das correntes dos terminais, \dot{I}_L e \dot{I}_R , para detectar faltas internas. Vale mencionar que essas grandezas podem ser calculadas de diferentes formas, a depender do fabricante. Nesta pesquisa, considerou-se a proteção diferencial de corrente tal como descrito em (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Nesse contexto, a primeira grandeza é a corrente de operação I_{op} , dada pelo valor absoluto da diferença entre os fasores das correntes terminais (considerando que as polaridades dos TCs sejam tais que, em operação normal e faltas externas, os sinais de corrente dos terminais tenham o mesmo sentido), de acordo com a equação (2.5).

$$I_{op} = |\dot{I}_L - \dot{I}_R| \quad (2.5)$$

A segunda grandeza, por sua vez, é a corrente de restrição I_{re} , calculada por meio da média entre os módulos dos fasores, conforme apresentado pela equação (2.6).

$$I_{re} = \frac{|\dot{I}_L| + |\dot{I}_R|}{2} \quad (2.6)$$

O critério principal de detecção de faltas internas desses algoritmos é a verificação da desigualdade (2.7), em que K_{SL} é o *slope* da proteção. Se a desigualdade for verdadeira, o método diferencial detecta a falta interna na LT protegida.

$$I_{op} > K_{SL} \cdot I_{re} \quad (2.7)$$

Ainda assim, na bibliografia, pode-se encontrar outras abordagens que também são baseadas em fasores, mas cuja detecção de faltas difere da solução diferencial convencional.

Os artigos (SILVA; BAINY, 2016), (ALMEIDA; SILVA, 2017), e (HOSSAIN; LEE-VONGWAT; RASTGOUFARD, 2018), por exemplo, propõem soluções que utilizam um sistema de coordenadas complexo chamado de plano α .

O eixo das abscissas do plano α é composto por valores da parte real $\text{Re}\{\cdot\}$ de um número complexo chamado Γ , enquanto o eixo das ordenadas desse plano é composto por valores da parte imaginária $\text{Im}\{\cdot\}$ de Γ . Cada solução determina o número complexo Γ de uma maneira específica. Em (ALMEIDA; SILVA, 2017), por exemplo, tal quantidade é calculada por meio de uma razão de potências complexas, estimadas com os fasores de tensões e de correntes dos terminais da LT protegida. Já em (SILVA; BAINY, 2016), o algoritmo proposto baseia-se no plano α das correntes, calculado conforme (2.8).

$$\Gamma = \frac{(\text{Re}\{\dot{I}_L - \dot{I}_R\} + I_{re}) + j \cdot \text{Im}\{\dot{I}_L - \dot{I}_R\}}{(\text{Re}\{\dot{I}_L - \dot{I}_R\} - I_{re}) + j \cdot \text{Im}\{\dot{I}_L - \dot{I}_R\}} \quad (2.8)$$

Os métodos baseados em planos α tipicamente detectam faltas internas caso um ponto no plano descrevendo um dado valor calculado de Γ , isto é, com coordenadas $(\text{Re}\{\Gamma\}, \text{Im}\{\Gamma\})$, esteja dentro de uma região pré-definida, de maneira similar aos métodos de proteção de distância baseados em impedância.

O método apresentado em (BOLANDI et al., 2015), por sua vez, utiliza o valor da impedância diferencial Z_{dif} , computada por meio da razão entre a diferença entre os fasores das tensões dos terminais, \dot{V}_L e \dot{V}_R , e as correntes \dot{I}_L e \dot{I}_R , conforme apresentado pela equação (2.9), para detectar faltas internas.

$$Z_{\text{dif}} = \frac{\dot{V}_L - \dot{V}_R}{\dot{I}_L - \dot{I}_R} \quad (2.9)$$

O algoritmo detecta um evento de falta de forma semelhante à uma proteção de distância baseada em impedância, isto é, verificando se um dado valor de Z_{dif} encontra-se no interior de uma zona pré-determinada no plano complexo RX. Esse método requer os valores dos parâmetros de impedância série da LT protegida e valores de tensão.

Os métodos baseados em fasores, tais como o diferencial convencional e as abordagens consideradas, são geralmente efetivos para detectar faltas internas. No entanto, por serem baseados em quantidades fasoriais, esses métodos podem ser prejudicados por situações de variações na frequência fundamental do sistema (que pode variar dependendo dos

níveis de geração e carga), sinais transitórios com componentes de alta frequência e pelas componentes aperiódicas exponencialmente amortecidas presentes nos sinais de correntes de falta, que potencializam erros na estimação dos fasores e podem tornar a resposta dessas soluções de proteção demasiadamente lenta (TIFERES; MANASSERO JR., 2022).

Além disso, algoritmos baseados em fasores podem apresentar falhas de segurança em situações críticas de faltas externas envolvendo saturação de TC ou ruídos digitais significativos, de forma a necessitar critérios adicionais de confirmação de *trip* e critérios de detecção de falta externa, saturação de TCs, presença de componentes harmônicas, entre outros. Dessa forma, a maioria das linhas de pesquisa que compõem o estado da arte de proteção piloto de LTs envolve soluções que não trabalham com fasores.

2.2 Proteção piloto de linha baseada em propagação de ondas viajantes

Uma abordagem que vem sendo frequentemente considerada em algoritmos propostos em trabalhos recentes é a utilização da teoria de propagação de ondas viajantes para detectar faltas internas. As referências (TANG et al., 2017) e (LEI et al., 2018), por exemplo, apresentam soluções de proteção de linha por canal piloto baseadas nessa abordagem.

Vale comentar, entretanto, que a utilização de ondas viajantes em soluções de proteção vem sendo estudada e aplicada desde o final da década de 70 (CHAMIA; LIBERMAN, 1978), sendo uma aplicação de destaque a presente no sistema de transmissão de 765 [kV] que integra a usina hidrelétrica de Itaipu ao restante do SIN (REIS FILHO, 1993).

As faltas internas geralmente são detectadas por métodos baseados em ondas viajantes por meio de registros dos instantes de tempo referentes às chegadas das frentes de onda incidentes e refletidas produzidas pela falta.

Geralmente, algoritmos desse tipo são capazes de tanto detectar faltas rapidamente como de localizá-las. Entretanto, os métodos baseados em ondas viajantes tipicamente requerem frequências de amostragem da ordem de pelo menos centenas de [kHz] ou até mesmo da ordem de [MHz] para que a detecção das frentes de onda seja precisa. Assim, soluções desse tipo necessitam de equipamentos com capacidades de amostragem não compatíveis com a maioria dos IEDs comerciais convencionais, que geralmente possuem frequências de amostragem da ordem de alguns [kHz].

Vale comentar, também, que as velocidades de propagação das ondas viajantes v , que dependem dos valores das indutâncias ℓ e capacitâncias c por unidade de comprimento

da LT, conforme a equação (2.10), devem ser conhecidas para que os algoritmos baseados nessa abordagem apresentem respostas adequadas.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\ell \cdot c}} \quad (2.10)$$

No entanto, esses parâmetros variam de acordo com fatores externos tais como a temperatura ambiente (indutâncias) e a umidade relativa do ar (capacitâncias) (CHECCHI et al., 2011) em situações reais, o que pode afetar as respostas desses algoritmos.

Cabe ponderar, também, que métodos baseados em propagação de ondas geralmente são afetados adversamente por ruídos nas medições e podem apresentar falhas de operação em casos de faltas de alta impedância. Além disso, vale comentar que, por conta das altas frequências de amostragem necessárias para a identificação das frentes de onda, soluções baseadas em ondas viajantes geralmente demandam altas capacidades de processamento.

2.3 Proteção piloto de linha baseada em energia

O artigo (DANTAS; PELLINI; MANASSERO JR., 2018) apresenta soluções de proteção piloto diferencial de LTs baseadas nos fluxos de potência ativa, de potência reativa e de energia nos terminais ao longo do tempo. Esses fluxos são calculados por meio de integrações numéricas realizadas com os valores amostrados de tensão e corrente em cada um dos terminais da linha protegida.

Para detectar faltas, os métodos apresentados utilizam os fluxos de potência e as energias de operação e de restrição, que por sua vez são determinados e comparados de maneira análoga aos métodos de proteção diferencial convencionais baseados em fasores.

Os algoritmos apresentados em (DANTAS; PELLINI; MANASSERO JR., 2018) constituem uma melhoria significativa em relação à solução discutida em (AZIZ et al., 2008), que, por ser baseada apenas na comparação entre os fluxos de potência ativa nos terminais da LT protegida, pode apresentar falhas de operação a depender da resistência da falta (algoritmo não é eficiente para faltas de baixa impedância uma vez que tais faltas apresentam comportamento reativo), e ao algoritmo proposto em (WEN et al., 2014), que por sua vez requer períodos de amostragem precisamente iguais ao tempo de trânsito da LT, o que constitui um entrave considerável à generalização e à precisão do método.

Ainda assim, vale comentar que os métodos baseados em energia precisam de maior banda de comunicação no canal piloto e sincronismo de um número maior de amostragens,

uma vez que amostras de tensão também são coletadas nos terminais e trocadas pelos IEDs, o que aumenta a complexidade da infraestrutura requerida pela solução.

Além disso, os comportamentos transitórios dinâmicos de TPs capacitivos em eventos de faltas próximas podem afetar os valores amostrados de tensão. Também, vale destacar que os algoritmos que necessitam de amostras de tensão podem perder a referência em faltas próximas a um dos terminais, de modo que se fazem necessárias técnicas adicionais como a síntese de valores de tensão por meio de *phase-locked loops* (DANTAS; PELLINI; MANASSERO JR., 2018) ou filtros de memória (ALMEIDA; SILVA, 2017).

2.4 Proteção piloto de linha baseada em otimização

A referência (DAVYDOVA; SHCHETININ; HUG, 2020) apresenta uma metodologia que resolve simultaneamente os problemas de proteção (detecção de faltas) e de localização de faltas para linhas de média tensão.

O algoritmo resolve um problema de otimização que visa identificar qual o modelo de operação da linha (com falta ou em operação saudável) com que as medidas coletadas nos terminais se encaixam de forma mais consistente.

Embora seja uma solução que resolve dois problemas distintos (detecção e localização de faltas), o método apresentado nessa pesquisa é aplicável somente a alimentadores de média tensão, uma vez que os modelos desse tipo de linha não levam em consideração as características capacitivas de LTs com maior tensão.

Além disso, esse algoritmo requer a utilização de TCs e TPs óticos, que são tecnologias geralmente mais onerosas do que os transformadores de instrumentação convencionais.

Cabe notar, também, que algoritmos de proteção baseados em otimização geralmente possuem elevada carga computacional, o que requer *hardware* com capacidade de processamento considerável. Isso ocorre na medida em que os otimizadores geralmente precisam processar várias iterações até a convergência para a solução ótima.

2.5 Proteção piloto de linha baseada em inferência Bayesiana

As seções 2.2, 2.3 e 2.4 apresentaram soluções e abordagens encontradas nas referências bibliográficas que, embora não utilizem fasores como a função diferencial convencional,

necessitam de frequências de amostragem elevadas (métodos de proteção piloto baseados em propagação de ondas viajantes) ou valores amostrados de tensão (métodos baseados em energia e potência) ou transformadores de instrumentação óticos (método baseado em otimização).

Assim, é possível notar que métodos de proteção piloto que trabalhem com frequências de amostragem compatíveis com a maioria dos IEDs comerciais disponíveis no mercado (valores na faixa de alguns [kHz]), utilizem apenas amostras de corrente dos terminais e operem com medições de TCs convencionais podem ser vantajosos ante os referenciados do ponto de vista de implementação sem a necessidade de se melhorar a infraestrutura de proteção piloto convencional.

Nesse contexto, o artigo (TIFERES; MANASSERO JR., 2022) apresenta um algoritmo de proteção piloto diferencial de LTs que utiliza apenas as amostras dos terminais, \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , dadas conforme as equações (2.1) e (2.2), trabalha com as medidas de TCs convencionais e com frequências de amostragem da ordem de [kHz] para detectar faltas.

Esse método calcula, a partir das amostras das correntes, a probabilidade de ocorrência de uma falta interna na linha ao longo do tempo, por meio da aplicação da inferência Bayesiana (Teorema de Bayes).

A partir das amostras $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, o algoritmo calcula amostras de corrente de operação $i_{op,k}$ e de restrição $i_{re,k}$, por meio das equações (2.11) e (2.12).

$$i_{op,k} = |i_{L,k} - i_{R,k}| \quad (2.11)$$

$$i_{re,k} = \frac{|i_{L,k}| + |i_{R,k}|}{2} \quad (2.12)$$

Convém notar que, ao contrário do algoritmo diferencial convencional, em que as correntes de operação e restrição são calculadas a partir dos fasores, o algoritmo proposto nessa referência calcula as correntes de operação e restrição diretamente a partir das amostras das correntes dos terminais da linha.

Com os valores de correntes de operação e restrição e com o *slope* K_{SL} , que é ajustado tal como no método diferencial convencional (característica percentual, com valores típicos de 30%, 50% ou 70%, por exemplo), o algoritmo verifica se $i_{op,k}$ supera $i_{re,k}$ multiplicada pelo *slope*, conforme a equação (2.13). A variável lógica ψ_k recebe 1 caso a verificação seja confirmada e recebe 0 caso contrário.

$$\psi_k = \begin{cases} 1, & i_{op,k} > K_{SL} \cdot i_{re,k} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.13)$$

No entanto, diferentemente do método fasorial, a detecção de faltas internas não pode ser baseada apenas nos valores lógicos de ψ_k (comparação entre grandezas de operação e restrição), uma vez que fatores tais como erros entre os TCs dos terminais e correntes capacitivas em condições de baixo carregamento (HOROWITZ; PHADKE, 2014) podem fazer com que existam eventuais valores ψ_k verdadeiros (iguais a 1) durante operação normal e eventuais valores ψ_k falsos (iguais a 0) durante faltas internas. Dessa forma, apenas a utilização dos valores ψ_k como critério de *trip* poderia levar o método a produzir falhas de segurança ou operação.

Assim, o método utiliza os valores de ψ_k , em conjunto com os parâmetros de ajuste p_1 (probabilidade de um dado valor ψ_k ser verdadeiro durante falta interna), p_2 (probabilidade de um dado valor ψ_k ser verdadeiro durante operação normal ou falta externa) e β , que é um fator de peso para as amostras mais recentes nos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , para determinar a probabilidade de falta P por meio da aplicação do Teorema de Bayes às condições de contorno do algoritmo, que consideram probabilidades condicionais e funções de verossimilhança, resultando na equação (2.14)

$$P = \frac{1}{1 + \varphi} \quad (2.14)$$

em que φ é dado conforme a equação (2.15)

$$\varphi = \frac{1 - \xi}{\xi} \cdot \left(\frac{p_2 \cdot (1 - p_1)}{p_1 \cdot (1 - p_2)} \right)^{\sum_{k=1}^N \psi_k} \cdot \left(\frac{1 - p_2}{1 - p_1} \right)^N \quad (2.15)$$

e ξ é dado conforme a equação (2.16).

$$\xi = \left(\sum_{k=1}^N e^{k \cdot \beta} \cdot \psi_k \right) \cdot \left(\sum_{k=1}^N e^{k \cdot \beta} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

O algoritmo detecta faltas internas caso P seja maior do que uma probabilidade mínima, p , e caso a maior amostra de corrente diferencial $i_{op,k}$ dentre as N calculadas supere um valor mínimo pré-determinado, i_M . Vale destacar que a utilização dessas condições para a detecção de faltas internas pode ser empregada, também, para linhas de transmissão em corrente contínua com conversores comutados pela rede de corrente alternada (conversor do tipo fonte de corrente), conforme apresentado na referência (TIFERES; DANTAS; MANASSERO JR., 2022).

Além disso, vale comentar também que a aplicação da teoria da inferência Bayesiana pode ser aplicada para outras funções de proteção. Nesse contexto, em (TIFERES; MANASSERO JR., 2022), o Teorema de Bayes é aplicado à proteção de distância para

calcular a probabilidade de falta na primeira zona, utilizando parâmetros de ajuste semelhantes aos do algoritmo de proteção diferencial e valores de impedância estimados a partir de formulações de mínimos quadrados (MQ), tal como na referência (BORNARD; BASTIDE, 1982).

As impedâncias estimadas por MQ entram na zona em menos tempo do que as estimadas com fasores quando ocorre uma falta interna na zona protegida. Entretanto, os valores de resistência e indutância obtidos por meio das soluções de formulações de MQ possuem incertezas e variações numéricas razoáveis, de forma que o critério Bayesiano confere um aumento significativo na confiabilidade da tomada de decisão de *trip* do algoritmo.

Assim, enquanto no contexto da proteção diferencial, a inferência Bayesiana é utilizada para calcular a probabilidade de falta a partir das amostras de correntes de operação e restrição (afetadas por correntes capacitivas e erros entre os TCs), no contexto da proteção de distância, o Teorema de Bayes é aplicado para calcular as probabilidades de falta na zona a partir dos valores de impedância estimados por MQ (afetados por ruídos diversos e flutuações numéricas), para que, em ambos os contextos, o critério e valor da probabilidade de falta configure uma solução de detecção de faltas efetiva.

No entanto, embora esses algoritmos sejam rápidos e eficazes nos seus respectivos contextos (proteção diferencial em LTs de corrente alternada e contínua e proteção de distância em linhas de corrente alternada), suas respostas são influenciadas e dependentes diretamente dos valores escolhidos para os parâmetros de ajuste, que, por sua vez, são bastante específicos (valores de probabilidades condicionais e fatores multiplicativos).

No algoritmo de proteção piloto diferencial, apresentado em (TIFERES; MANASSERO JR., 2022), os parâmetros p_1 , p_2 , β e β tiveram seus valores ajustados para 0,75, 0,05, 4 e 0,10 respectivamente. Este conjunto de valores foi determinado empiricamente, a partir de diversos testes que visaram obter qual a configuração de valores que, para a linha de 500 [kV] protegida, resultam nas melhores respostas do método sob os critérios de velocidade, segurança e confiabilidade. Entretanto, para LTs com características distintas, é possível que o melhor conjunto de ajustes seja diferente dos obtidos para a linha em que o algoritmo foi testado. Além disso, o método precisa de critérios de estabilização para não apresentar falhas de segurança em casos com saturação de TC, que conseqüentemente atrasam o *trip* em faltas internas.

Dessa forma, algoritmos de proteção piloto de LTs que não sejam tão dependentes dos valores dos parâmetros de ajuste e que não demandem critérios adicionais de estabilização que podem retardar comandos de *trip* podem ser vantajosos ante tal metodologia.

2.6 Proteção piloto de linha baseada em distância entre os vetores de corrente

As referências (CHEN et al., 2018) e (YANG et al., 2022) apresentam respectivamente algoritmos de proteção piloto de LTs cujas lógicas de detecção de faltas internas levam em conta as distâncias $D(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ de Hausdorff e euclidiana adaptada entre os vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R para detectar faltas internas. A distância de Hausdorff, utilizada pelo método apresentado em (CHEN et al., 2018), é calculada conforme a equação (2.17).

$$D(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \max(H_{LR}, H_{RL}) \quad (2.17)$$

onde H_{LR} e H_{RL} são dados conforme as equações (2.18) e (2.19).

$$H_{LR} = |\max(\mathbb{I}_L) - \min(\mathbb{I}_R)| \quad (2.18)$$

$$H_{RL} = |\max(\mathbb{I}_R) - \min(\mathbb{I}_L)| \quad (2.19)$$

A referência (YANG et al., 2022), por sua vez, transforma a métrica tradicional de distância euclidiana entre os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , dada conforme a equação (2.20), na distância euclidiana adaptada calculada por meio da equação (2.21). Neste algoritmo, β é um resíduo numérico considerado para evitar eventuais divisões por zero.

$$D(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (i_{L,k} - i_{R,k})^2} \quad (2.20)$$

$$D(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (|i_{L,k}| - |i_{R,k}|)^2}}{\min\left(\sqrt{\sum_{k=1}^N (i_{L,k})^2}, \sqrt{\sum_{k=1}^N (i_{R,k})^2}\right) + \beta} \quad (2.21)$$

O princípio de detecção de faltas utilizado pelos algoritmos propostos nessas referências é similar. Em situações de operação normal ou de faltas externas à LT protegida, as correntes têm mesmo sentido e valores semelhantes, de forma que as distâncias $D(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ tendem a ser próximas a zero. Entretanto, durante faltas internas, as distâncias aumentam uma vez que, por conta dos *infeeds* de corrente de falta de cada terminal, os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R passam a ter valores diferentes entre si.

Dessa forma, a falta interna é detectada quando a distância calculada $D(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ supera um valor limite pré-definido D_{\min} . Tal abordagem é eficiente para identificar faltas internas com rapidez, e pode ser aplicada com diversas medidas de distância entre \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

Entretanto, o valor do parâmetro D_{\min} não pode ser generalizado para linhas com níveis de tensão diversos e com valores variados de potências de curto-circuito nos terminais, que são determinantes para as magnitudes das correntes de falta, e conseqüentemente para os valores de distância.

Assim, o valor da distância mínima deve ser ajustado conforme a aplicação para detectar faltas internas sem cometer falhas de segurança ou operação. Logo, esses algoritmos não podem ser generalizados para quaisquer LTs, visto que o valor mais apropriado de D_{\min} pode ser diferente de acordo com a linha a ser protegida.

2.7 Proteção piloto de linha baseada em correlação e similaridade

Uma abordagem similar à utilização de medidas de distância entre os vetores contendo amostras de corrente dos terminais \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R para detectar faltas internas é a utilização de medidas de correlação e similaridade.

Valores de correlação e similaridade vem sendo frequentemente empregados em diversas aplicações nas ciências de dados modernas. São métricas que quantificam o quanto dois conjuntos de dados são similares entre si, e seus valores sempre se encontram na faixa compreendida por -1 e 1. Quanto maior a similaridade entre os conjuntos de dados, maior o valor da métrica de correlação (mais próximo de 1), e quanto menor a similaridade, menor o valor do coeficiente de correlação (mais próximo de -1).

Cabe notar que, justamente por estarem sempre situados entre -1 e 1, a utilização de valores de correlação pode ser vantajosa ante a utilização de medidas de distância, uma vez que como a faixa dos valores de correlação possíveis é a mesma independente da aplicação, os algoritmos de proteção piloto baseados nessa abordagem podem ser generalizados para LTs com características diversas mais facilmente do que os baseados nas distâncias entre os vetores contendo as amostras de corrente.

Nesse contexto, a referência (JIA et al., 2018) propõe um algoritmo de proteção piloto de linha que utiliza a correlação de Pearson, dada conforme a equação (2.22), onde $\text{Cov}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ representa a covariância entre os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , $\text{Var}(\mathbb{I}_L)$ representa a variância do vetor \mathbb{I}_L e $\text{Var}(\mathbb{I}_R)$ representa a variância do vetor \mathbb{I}_R , para a detecção de faltas internas.

$$\text{Pearson}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \frac{\text{Cov}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)}{\sqrt{\text{Var}(\mathbb{I}_L)} \cdot \sqrt{\text{Var}(\mathbb{I}_R)}} \quad (2.22)$$

O artigo (JIA et al., 2021), por sua vez, apresenta uma solução cuja detecção de faltas utiliza o coeficiente de correlação de postos de Spearman, dado conforme a equação (2.23), onde d_k representa a diferença entre os postos (do inglês *rank*) das amostras $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, que são as posições dessas amostras nos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R ordenados de forma crescente.

$$\text{Spearman}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = 1 - 6 \cdot \frac{\sum_{k=1}^N (d_k)^2}{N \cdot (N^2 - 1)} \quad (2.23)$$

De forma similar, a referência (ZHANG et al., 2022) propõe um método de proteção piloto de linha que utiliza o coeficiente de correlação de Kendall para a detecção de faltas internas. Esse coeficiente de correlação é calculado conforme a equação (2.24), onde N_C é o número de pares de pontos $(i_{L,k}, i_{R,k})$ e $(i_{L,\ell}, i_{R,\ell})$ concordantes e N_D é o número de pares de pontos $(i_{L,k}, i_{R,k})$ e $(i_{L,\ell}, i_{R,\ell})$ discordantes.

$$\text{Kendall}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = 2 \cdot \frac{N_C - N_D}{N \cdot (N - 1)} \quad (2.24)$$

Dado ℓ diferente de k , um par de pontos $(i_{L,k}, i_{R,k})$ e $(i_{L,\ell}, i_{R,\ell})$ é concordante caso (2.25) e (2.26) ou (2.27) e (2.28) sejam verificadas e é discordante caso contrário.

$$i_{L,k} > i_{L,\ell} \quad (2.25)$$

$$i_{R,k} > i_{R,\ell} \quad (2.26)$$

$$i_{L,k} < i_{L,\ell} \quad (2.27)$$

$$i_{R,k} < i_{R,\ell} \quad (2.28)$$

Caso haja pares de pontos $(i_{L,k}, i_{R,k})$ e $(i_{L,\ell}, i_{R,\ell})$ com empates, isto é, em que $i_{L,k}$ seja igual a $i_{L,\ell}$ e/ou $i_{R,k}$ seja igual a $i_{R,\ell}$, o método calcula o coeficiente de correlação conforme a equação (2.29), onde T_L é o número de valores $i_{L,k}$ e $i_{L,\ell}$ empatados, T_R é o número de valores $i_{R,k}$ e $i_{R,\ell}$ empatados e N_0 é dado conforme a equação (2.30).

$$\text{Kendall}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \frac{N_C - N_D}{\sqrt{N_0 - T_L} \cdot \sqrt{N_0 - T_R}} \quad (2.29)$$

$$N_0 = \frac{N \cdot (N - 1)}{2} \quad (2.30)$$

As referências (ZHENG et al., 2021) e (ZHENG et al., 2022), por outro lado, apresentam um algoritmo cuja detecção de faltas é baseada nos coeficientes de similaridade

de cosseno, do inglês *cosine similarity*, calculados de acordo com a equação (2.31).

$$\text{Cosseno}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \frac{\sum_{k=1}^N i_{L,k} \cdot i_{R,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (i_{L,k})^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^N (i_{R,k})^2}} \quad (2.31)$$

O artigo (ZHENG et al., 2020), finalmente, propõe um método que utiliza a similaridade estrutural, do inglês *structural similarity*, para a detecção de faltas internas.

A similaridade estrutural é bastante empregada em processamento de imagens, e é calculada conforme a equação (2.32), onde C_1 e C_2 são calculados respectivamente conforme as equações (2.33) e (2.34), em que L é a maior diferença entre dois valores correspondentes aos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

$$\text{Estrutural}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \frac{[2 \cdot \text{Média}(\mathbb{I}_L) \cdot \text{Média}(\mathbb{I}_R) + C_1] \cdot [2 \cdot \text{Cov}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) + C_2]}{[\text{Média}(\mathbb{I}_L) + \text{Média}(\mathbb{I}_R) + C_1] \cdot [\text{Var}(\mathbb{I}_L) + \text{Var}(\mathbb{I}_R) + C_2]} \quad (2.32)$$

$$C_1 = (0,01 \cdot L)^2 \quad (2.33)$$

$$C_2 = (0,03 \cdot L)^2 \quad (2.34)$$

Todas as abordagens de correlação utilizadas pelos métodos citados configuram, de acordo com os resultados apresentados nas referências mencionadas, alternativas efetivas para detectar faltas internas rapidamente à LT protegida.

Entretanto, em condições mais críticas para algoritmos de proteção piloto, com destaque para faltas externas com saturação severa dos TCS, sinais com alto teor de ruídos e desalinhamentos entre as amostras dos terminais (causados por diferenças significativas entre os instantes de aquisição dos terminais), esses algoritmos estão mais sujeitos a ocorrências de falhas de segurança do que se as técnicas de correlação utilizadas fossem mais robustas a dados suspeitos (*outliers*), que podem influenciar os valores de correlação.

Isso ocorre pois, como se pode observar nas equações relativas a cada método, as técnicas empregadas nos algoritmos encontrados na literatura dependem diretamente dos valores instantâneos das amostras de corrente, ou de postos ou de valores de variância e covariância dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , que podem ser afetados por dados inconsistentes.

Por isso, em meio a tais condições críticas (que estão associadas com dados que prejudicam os valores instantâneos, postos, médias e variâncias, e conseqüentemente os resultados calculados por essas técnicas de correlação), esses métodos podem apresentar falhas

de segurança em eventos de faltas externas, que por sua vez podem causar consequências severas para o sistema elétrico de potência.

2.8 Contribuição desta pesquisa

Assim, tendo em vista as considerações realizadas acerca das soluções encontradas na bibliografia referente à proteção de linhas por canal piloto, esta pesquisa tem por objetivo principal propor um novo método de proteção piloto que, tal como os descritos na seção anterior, é também baseado em uma medida de correlação.

Conforme discutido previamente, os métodos baseados nessa estratégia podem ser vantajosos ante as demais abordagens, uma vez que não necessitam de quaisquer parâmetros da LT protegida, melhorias nas infraestruturas de proteção convencionais e frequências de amostragem incompatíveis com a maioria dos equipamentos comerciais e que, como os valores assumidos pelas métricas de correlação figuram sempre entre o intervalo compreendido entre -1 e 1, podem ser generalizados para LTs com diversos níveis de tensão, comprimento, potências de curto-circuito nos terminais, entre outras características.

Entretanto, diferentemente dos trabalhos existentes, o algoritmo proposto neste trabalho utiliza coeficientes de *biweight midcorrelation* (BWMC) ao invés das correlações citadas. A BWMC pode ser vantajosa ante as outras técnicas de correlação encontradas nos algoritmos da literatura pois é essencialmente baseada em cálculos que utilizam as medianas dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , o que confere robustez contra ruídos e *outliers* maior do que a utilização direta dos valores das amostras, dos postos ou das médias e variâncias dos vetores das correntes terminais, conforme o discutido acerca de estimadores de correlação robustos na referência (WILCOX, 2017).

Assim, a utilização da BWMC garante robustez maior às condições críticas que podem comprometer o desempenho dos algoritmos baseados nas outras técnicas de correlação. Além disso, o método proposto é tão rápido quanto as demais alternativas para a detecção de faltas internas. Vale mencionar, em complemento, que por conta de uma rotina computacional de cálculo de medianas também desenvolvida neste trabalho, explorada com detalhes no Apêndice deste documento, o algoritmo proposto pode ser facilmente implementado em processadores disponíveis em equipamentos industriais convencionais.

Conforme está detalhado nos próximos capítulos desta pesquisa, os resultados acerca da maior robustez apresentada pelo algoritmo proposto, bem como de sua velocidade para detectar faltas internas à linha protegida e implementação possível em *hardware* comercial

convencional, foram verificados a partir de diversas simulações e testes experimentais, conduzidas tanto com os sinais de milhares de faltas simuladas no programa de transitórios eletromagnéticos *Alternative Transients Program* (ATP) como com sinais de corrente registrados pela instrumentação de proteção em campo durante oito eventos de falta reais em quatro linhas de 500 [kV] pertencentes à Rede Básica (RB) de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro.

Portanto, tendo em vista as ponderações realizadas nesta seção, em complemento com o apresentado na seção de motivação e objetivos deste trabalho, a contribuição principal desta pesquisa para o estado da arte dos algoritmos de proteção piloto reside na proposta um novo método que é tão rápido quanto as alternativas baseadas em correlação e similaridade existentes na literatura, mas que ao mesmo tempo é mais robusto e seguro, sobretudo nas condições tipicamente mais críticas que costumam comprometer o desempenho da maioria das soluções de proteção de LTs por canal piloto.

Além disso, destaca-se novamente que o algoritmo apresentado não requer quaisquer melhorias estruturais nos arranjos e equipamentos de proteção existentes atualmente e não necessita dos parâmetros da LT a ser protegida, possibilitando a generalização da solução apresentada para linhas com características diversas.

3 Metodologia

Este capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia associada ao algoritmo de proteção piloto de LTs proposto no trabalho. São apresentados, nesse contexto, a topologia de proteção por canal piloto necessária para a implementação da solução proposta, as operações envolvidas para a determinação dos valores de BWMC entre os vetores de correntes \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R e a lógica de *trip* do algoritmo, baseada essencialmente nesses valores.

3.1 Topologia de proteção requerida pelo algoritmo

A figura 3.1 ilustra de maneira simplificada um arranjo de proteção de LT por canal piloto genérico com comunicação por cabo OPGW em que o algoritmo proposto, que necessita apenas de amostras das correntes dos terminais (L e R), pode ser empregado.

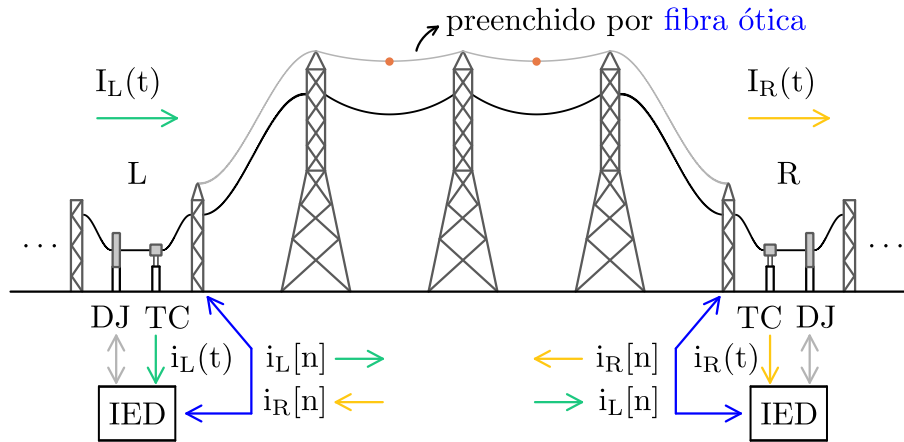


Figura 3.1: Topologia de proteção de LT necessária para a utilização do algoritmo

Os TCs de cada terminal reduzem as respectivas correntes primárias $I_L(t)$ e $I_R(t)$ nas correntes secundárias $i_L(t)$ e $i_R(t)$, que são amostradas pelos IEDs a cada intervalo de tempo $T_a = 1/f_a$, onde f_a é a frequência de amostragem do sistema de proteção.

Os valores amostrados das correntes dos terminais da linha são indicados respectivamente por $i_L[n]$ e $i_R[n]$, onde n é o número da n -ésima amostragem em relação à última inicialização do algoritmo, $t_{L,n}$ é o instante de tempo correspondente à n -ésima amostragem no terminal local (L) e $t_{R,n}$ é o instante de tempo correspondente à n -ésima amostragem no terminal remoto (R).

O algoritmo de pingue-pongue (IEEE, 2015), que conforme mencionado, é uma das alternativas mais utilizadas, sincroniza os instantes de amostragem em cada terminal para que, em condições ideais, as correntes secundárias sejam amostradas em instantes $t_{L,n}$ e $t_{R,n}$ virtualmente iguais, com precisão da ordem de um período de amostragem, T_a .

Os métodos de pingue-pongue empregados em instalações modernas são tipicamente adaptativos, na medida em que identificam diferenças mais significativas entre os instantes de amostragem e as corrigem. Dessa forma, as maiores diferenças entre $t_{L,n}$ e $t_{R,n}$ que podem ocorrer em situações práticas são sempre inferiores a um período de amostragem, com a maior diferença possível sendo metade de um intervalo de amostragem, $T_a/2$.

O método de proteção piloto é executado em tempo real em pelo menos um dos IEDs. Ainda assim, vale comentar que, do ponto de vista de redundância, é interessante que o algoritmo opere em ambos os IEDs simultaneamente. Quando uma falta interna à LT protegida é detectada, os IEDs enviam sinais de *trip* entre si pelo canal de comunicação e aos seus respectivos disjuntores (DJs).

Em cada IED que executa o algoritmo, há, por fase, dois vetores contendo N amostras de corrente cada (\mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R), conforme as equações (2.1) e (2.2). Ambos os vetores são, na etapa de inicialização do método, preenchidos com zeros. À medida em que novas amostragens vão sendo executadas, as novas amostras vão sendo incorporadas aos vetores.

Os vetores contendo os valores amostrados de corrente, \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , podem ser implementados no formato de *buffer* circular. Nessa implementação, um ponteiro p , que varre todas as N posições de forma cíclica, aponta para as posições dos vetores respectivos, $i_{L,p}$ e $i_{R,p}$, em que as amostras mais recentes ($i_{L}[n]$ e $i_{R}[n]$) entram no lugar das amostras previamente mais antigas ($i_{L}[n - N]$ e $i_{R}[n - N]$). Após as entradas das amostras mais recentes nos vetores, p passa a apontar para a próxima posição de cada *buffer*, retornando à posição 1 após passar pela posição final, N .

Vale comentar que a implementação em *buffer* circular é mais eficiente do ponto de vista computacional do que a implementação em janelas móveis (em que geralmente a amostra na posição N é a mais recente e a na posição 1 é a mais antiga), uma vez que a implementação de janelas de dados móveis requer cópias de memória a cada nova atualização dos vetores de dados amostrados.

Além disso, para o algoritmo proposto, a utilização de *buffers* circulares para a implementação dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R é eficiente pois, desde que as amostras dos terminais coletadas na mesma aquisição n estejam nas mesmas posições k de cada vetor, o valor de BWMC entre os vetores, $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$, permanece constante.

Isso ocorre pois a determinação da BWMC, explicada na próxima seção, requer apenas que as amostras coletadas na n -ésima amostragem de cada terminal estejam nas mesmas posições $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, não exigindo com que as amostras que compõem os vetores estejam ordenadas temporalmente tal como em janelas móveis.

A título de exemplo, considere uma situação em que $N = 4$ e os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R encontram-se preenchidos com valores genéricos conforme as equações (3.1) e (3.2).

$$\mathbb{I}_L = \{i_L[n-3], i_L[n-2], i_L[n-1], i_L[n]\} \quad (3.1)$$

$$\mathbb{I}_R = \{i_R[n-3], i_R[n-2], i_R[n-1], i_R[n]\} \quad (3.2)$$

É possível observar que, nesse caso, os valores amostrados alojados nas posições $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, com $1 \leq k \leq N = 4$, estão ordenados temporalmente (amostras mais recentes nas posições N e mais antigas nas posições 1). Entretanto, conforme a equação (3.3), os valores de $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ são os mesmos independentemente da ordenação dos vetores, desde que os valores com mesmo número de amostragem estejam nas mesmas posições, em seus respectivos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

$$\begin{aligned} & BWMC(\{i_L[n-3], i_L[n-2], i_L[n-1], i_L[n]\}, \\ & \quad \{i_R[n-3], i_R[n-2], i_R[n-1], i_R[n]\}) = \dots \\ & \quad \dots \\ & = BWMC(\{i_L[n], i_L[n-1], i_L[n-2], i_L[n-3]\}, \\ & \quad \{i_R[n], i_R[n-1], i_R[n-2], i_R[n-3]\}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

A cada nova amostragem, intercâmbio de amostras mais recentes $i_L[n]$ e $i_R[n]$ e atualização dos *buffers* de valores amostrados \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R por meio da inclusão de tais amostras, o algoritmo calcula novos valores de $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$, conforme apresentado a seguir.

3.2 Cálculo da BWMC entre as correntes terminais

Dados dois vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com N amostras de corrente nas posições $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, conforme as equações (2.1) e (2.2), o coeficiente de BWMC utilizado no algoritmo proposto nesta pesquisa entre esses vetores é calculado por meio das equações apresentadas a seguir.

A sequência de operações é a mesma para os dois terminais da LT protegida, L e R. Dessa forma, os índices correspondentes aos terminais, nos coeficientes vinculados com a BWMC utilizada no algoritmo, apresentados nas relações a seguir, foram representados genericamente por T, onde $T = \{L, R\}$.

Primeiramente, o algoritmo calcula as medianas dos vetores/*buffers* de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , indicadas por $\text{Mediana}(\mathbb{I}_L)$ e $\text{Mediana}(\mathbb{I}_R)$. Conforme está explicado mais adiante, foi desenvolvida uma rotina computacional que permite com que as medianas sejam calculadas de forma a dispensar reordenações dos vetores, o que diminui significativamente a carga de processamento do algoritmo.

Em seguida, com as amostras $i_{T,k}$ de cada terminal e as respectivas medianas, o algoritmo calcula N coeficientes $u_{T,k}$, que são as diferenças entre cada amostra e a mediana correspondente, conforme a equação (3.4).

$$u_{T,k} = i_{T,k} - \text{Mediana}(\mathbb{I}_T) \quad (3.4)$$

Os coeficientes $u_{T,k}$ são utilizados pelo algoritmo para decidir se um dado valor amostrado $i_{T,k}$ é ou não um *outlier*, isto é, um dado inconsistente com o restante das medições. Para tomar essa decisão, a métrica de BWMC considerada no algoritmo desenvolvido nesta pesquisa calcula, para cada terminal, a média entre os valores absolutos de $u_{T,k}$ multiplicada por uma constante K . Tais valores são identificados no algoritmo como M_T , conforme a equação (3.5).

$$M_T = \frac{K}{N} \cdot \sum_{k=1}^N |u_{T,k}| \quad (3.5)$$

Vale tecer, nesta etapa da determinação da BWMC utilizada no algoritmo de proteção proposto, algumas considerações relevantes a respeito do cálculo dos valores M_T , apresentadas nos próximos parágrafos.

Segundo (WILCOX, 2017), o valor típico a ser adotado para a constante multiplicativa K é nove. Desse modo, o algoritmo foi implementado com esse valor. Ainda assim, em testes iniciais, foram considerados valores diferentes de 9 para K , que é uma constante importante na decisão de considerar ou não uma dada amostra como *outlier*, conforme o apresentado na próxima etapa. A conclusão obtida nesses testes é a de que valores de K menores do que N podem ser mais apropriados do que valores mais elevados, pois um menor valor de K torna o critério de identificação de *outliers* mais severo.

Como encontra-se detalhado nos próximos capítulos, os menores valores de N para os quais o algoritmo proposto apresenta desempenho satisfatório são os que correspondem a meio ciclo (MC) de um período fundamental. Tendo em vista que a maioria dos IEDs comerciais utilizam frequências de amostragem da ordem de grandeza de alguns [kHz], como é o caso do dispositivo utilizado na verificação experimental do algoritmo proposto,

o valor de N correspondente a meio ciclo de amostras costuma ser maior do que 9. No caso do IED utilizado, por exemplo, a taxa de amostragem é de 3,84 [kHz], correspondente a 64 amostras por ciclo de 60 [Hz]. Logo, o valor de N correspondente ao tamanho de MC é 32, de forma que o ajuste $K = 9$ é apropriado.

De forma geral, recomenda-se sempre a utilização do ajuste típico de nove para a constante K , conforme (WILCOX, 2017). Este valor se mostrou satisfatório, tendo em vista todas as análises conduzidas ao longo da pesquisa. Além disso, a adoção de tal ajuste dispensa uma parametrização adicional do algoritmo. Ainda assim, caso N seja menor do que 9, pode ser interessante diminuir o valor de K . Entretanto, vale comentar que, quanto menor o valor dessa constante, mais severo é o critério de identificação de *outliers*, apresentado na sequência.

Em complemento, vale comentar também a respeito da média aritmética entre os valores absolutos dos coeficientes $u_{T,k}$, calculada para a determinação dos respectivos valores M_T . Da forma como considerada no algoritmo proposto, os valores M_T são proporcionais ao desvio médio absoluto das amostras em relação às medianas. Em referências como (WILCOX, 2017), por outro lado, os parâmetros correspondentes aos identificados como M_T no algoritmo são calculados tipicamente através das medianas dos valores absolutos dos coeficientes $u_{T,k}$, ao invés das médias.

Ainda assim, optou-se por calcular os parâmetros M_T com as médias ao invés de medianas dos valores absolutos dos coeficientes $u_{T,k}$ no algoritmo pois, na aplicação de interesse desta pesquisa, sob os pontos de vista de velocidade de detecção de faltas internas e segurança e confiabilidade nas condições desafiadoras, a utilização de medianas não apresentou mudanças significativas em relação à utilização das médias.

Além disso, diferentemente dos cálculos das medianas dos vetores de amostras, \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , que podem ser realizados de forma eficiente na medida em que reordenações podem ser dispensadas, conforme apresentado mais adiante, os cálculos das medianas dos valores absolutos dos coeficientes $u_{T,k}$ demandam reordenações, na medida em que tais valores mudam a cada atualização dos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R . Dessa forma, caso fossem utilizadas as medianas de $|u_{T,k}|$ ao invés das medias nos cálculos dos valores M_T , a complexidade de tempo do algoritmo aumentaria significativamente e deixaria de ser linear com N em todos os cenários, o que potencializaria complicações tendo em vista a execução do método em tempo real com processadores comerciais.

Portanto, com os coeficientes $u_{T,k}$ e M_T dos dois terminais calculados, o algoritmo parte para a identificação de quais amostras $i_{T,k}$ são consistentes com as medições e quais

são *outliers*. Para tanto, são determinados, de forma condicional e para cada terminal, N coeficientes $w_{T,k}$, chamados de pesos (em inglês, *weights*), conforme a equação (3.6).

$$w_{T,k} = \begin{cases} u_{T,k} \cdot \left[1 - \left(\frac{u_{T,k}}{M_T} \right)^2 \right], & 1 > \left| \frac{u_{T,k}}{M_T} \right| \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.6)$$

Vale destacar que o cálculo dos coeficientes de peso $w_{T,k}$ é um critério de identificação de *outliers*, uma vez que as amostras $i_{T,k}$ cujas diferenças em módulo sejam maiores do que K vezes a diferença média em relação à respectiva mediana de \mathbb{I}_T recebem peso zero, e logo não influenciam no resultado final da BWMC, de acordo com as próximas equações.

O critério de identificação de *outliers* da BWMC utilizada no algoritmo, que essencialmente avalia o quão longe uma dada medição está da mediana correspondente ao conjunto, é a principal diferença da medida de correlação considerada no método proposto em comparação com as demais técnicas. Este critério permite eliminar medições corrompidas, que podem afetar todas as demais técnicas de correlação e similaridade utilizadas nos algoritmos e soluções levantadas na pesquisa bibliográfica. Também, vale comentar que, para outras aplicações, poderiam ser vislumbrados e desenvolvidos outros critérios de identificação de dados *outliers*, caso considerado necessário.

Em seguida, o algoritmo normaliza os coeficientes de peso $w_{T,k}$ dividindo cada peso pela raiz quadrada da soma de todos os N pesos ao quadrado, conforme a equação (3.7), que por sua vez resulta em novos coeficientes identificados como $b_{T,k}$.

$$b_{T,k} = \frac{w_{T,k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (w_{T,k})^2}} \quad (3.7)$$

Os cálculos dos coeficientes $b_{T,k}$, que podem ser interpretados como pesos normalizados, não são interessantes computacionalmente, uma vez que requerem operações de potenciação seguidas por uma operação de radiciação. Ainda assim, a obtenção dos pesos normalizados é essencial para que o valor da BWMC entre os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , que é calculada através do produto interno dos coeficientes $b_{T,k}$, conforme a equação (3.8), resulte em um valor localizado obrigatoriamente no intervalo compreendido entre -1 e 1, o que é, conforme mencionado anteriormente, uma vantagem das medidas de correlação e similaridade ante as medidas de distância entre os vetores.

$$\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) = \sum_{k=1}^N b_{L,k} \cdot b_{R,k} \quad (3.8)$$

Pode-se observar, analisando-se as equações (3.4) a (3.8), que todos os cálculos e coeficientes envolvidos com a determinação de $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ têm caráter essencialmente estatístico, e não físico. Ainda assim, o algoritmo de proteção proposto nesta pesquisa, tal como as demais soluções baseadas em técnicas de correlação e similaridade, visa detectar a ocorrência de uma falta interna à LT protegida, que é um fenômeno físico, utilizando como base as respostas de uma grandeza estatística. Tal como mencionado anteriormente, essa estratégia de solução pode ser vantajosa na medida em que, por ser baseado em valores que necessariamente variam entre -1 e 1, o algoritmo proposto pode ser generalizado para diversas LTs sem a necessidade de serem feitos novos ajustes a cada nova aplicação.

Conforme mencionado anteriormente, a BWMC é uma medida de correlação entre os dois vetores de amostras. Quanto maior o valor de $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ (mais próximo de 1), maior a similaridade entre os vetores, e quanto menor (mais próximo de -1) o coeficiente de BWMC, menor a similaridade entre \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

Como a BWMC considera valores calculados a partir das medianas dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R e um critério de identificação de *outliers* ao invés dos valores amostrados ou de médias e covariâncias, ela é mais robusta a dados inconsistentes do que as outras técnicas de correlação propostas nos algoritmos encontrados na bibliografia. Logo, a utilização da BWMC para a detecção de faltas internas é menos suscetível a ocorrências de falhas de segurança em condições críticas que produzem dados *outliers* prejudiciais à maioria dos algoritmos de proteção de LT por canal piloto (faltas externas com saturação de TCs, medidas com baixas RSR e desalinhamento de amostras).

Desse modo, o método calcula, para cada fase (e também para as correntes de sequência, caso necessário) e a cada nova amostragem, um novo valor de $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$, através das etapas apresentadas. Estes valores de BWMC, finalmente, subsidiam a lógica de *trip* do algoritmo proposto, apresentada a seguir.

3.3 Lógica de detecção de faltas

Considere o sentido das correntes nos terminais da LT protegida, conforme indicado na figura 3.1 (correntes secundárias $i_L(t)$ e $i_R(t)$ possuem os mesmos sentidos das correntes primárias $I_L(t)$ e $I_R(t)$, respectivamente).

Em situações de operação normal da LT ou de faltas externas, as duas correntes mantêm o mesmo sentido. Dessa forma, em tais situações, os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R possuem amostras $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$ similares, e portanto, os valores de BWMC entre esses vetores são

próximos a 1. Em faltas internas, por outro lado, as correntes provenientes dos equivalentes de Thévenin nos terminais passam a ter sentidos opostos e valores que podem diferir substancialmente.

Logo, à medida em que amostras de correntes de falta entram nos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , os valores de BWMC diminuem e aproximam-se de -1 (sendo que, quanto menores os valores de BWMC, menor a similaridade entre as amostras). Comenta-se, em complemento, que a inversão nos sentidos das correntes dos terminais costuma ocorrer tanto para as correntes de fase como para as de sequência zero. Ainda assim, na condição crítica e rara de falta interna com *outfeed*, as correntes de fase mantêm o mesmo sentido e apenas as correntes de sequência zero ficam com sentidos opostos, conforme está analisado mais adiante.

Nesse sentido, a figura 3.2 apresenta as correntes terminais secundárias, $i_L(t)$ e $i_R(t)$, e os coeficientes de BWMC entre os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R ao longo do tempo para uma situação de falta interna exemplo, que se inicia no instante $t = 0,03$ [s]. As correntes dos terminais foram amostradas à taxa de 64 amostras por ciclo de 60 [Hz] e os coeficientes de BWMC, nesse caso, utilizaram *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanho de um ciclo.

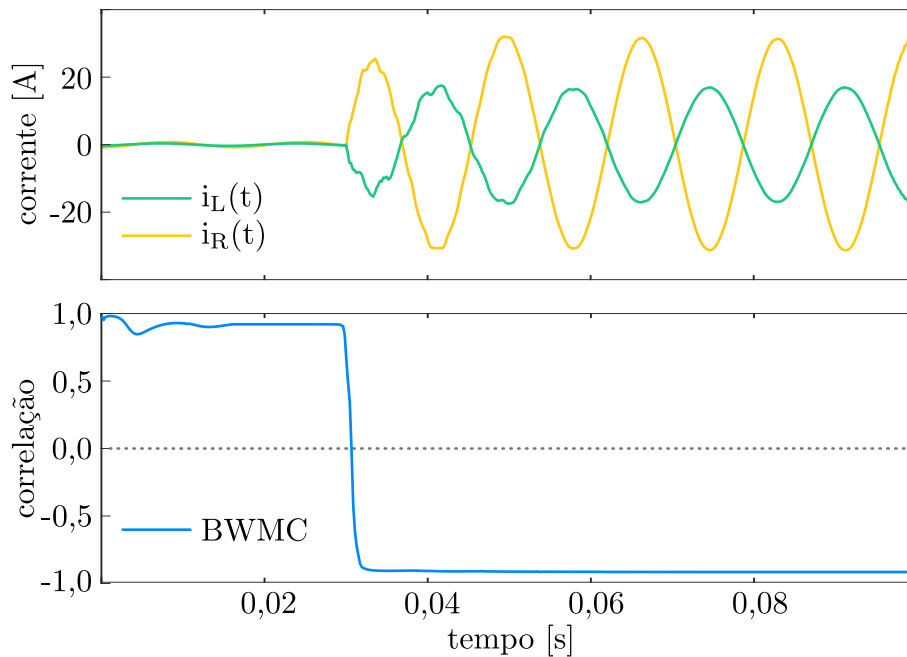


Figura 3.2: Correntes dos terminais e coeficientes de BWMC ao longo do tempo de uma fase envolvida em um caso de falta interna exemplo

É possível observar que, na condição de pré-falta, as correntes apresentam comportamento similar, o que consequentemente faz com que os coeficientes de correlação BWMC sejam altos. Entretanto, após o início da falta, as correntes ficam com sentidos opostos e valores diferentes, e à medida em que os IEDs passam a coletar amostras de corrente de falta, os valores de BWMC começam a se aproximar de -1.

Pode-se observar também que, nesse caso, durante o período de regime permanente da falta, os sinais de corrente dos terminais encontram-se praticamente em oposição de fase e os valores de BWMC calculados pelo algoritmo são aproximadamente constantes.

Dessa forma, o critério principal de detecção de faltas internas do algoritmo proposto é dado pela verificação da desigualdade (3.9). Em outras palavras, a primeira e principal condição de *trip* do método é satisfeita caso um valor calculado de BWMC entre os vetores de correntes dos terminais \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R seja menor do que zero.

$$\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) < 0 \quad (3.9)$$

O valor de zero para a correlação mínima foi escolhido tendo em vista que este valor é a média entre todos os valores possíveis que uma métrica de correlação pode assumir (valores entre -1 e 1). Além disso, considerando que, em uma falta interna como a apresentada pela figura 3.2, as correntes dos terminais passam a ter sentidos opostos, o valor de correlação nula representa o momento exato em que os sentidos das correntes se invertem, pois é o único valor em que $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ é igual a $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, -\mathbb{I}_R)$, uma vez que $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ é oposto a $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, -\mathbb{I}_R)$, conforme a equação (3.10).

$$\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, -\mathbb{I}_R) = -\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R) \quad (3.10)$$

A segunda condição que deve ser satisfeita para que o algoritmo detecte a falta, por sua vez, utiliza a maior diferença (em valor absoluto) entre as amostras $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$, que recebe o nome de i_D . Para a determinação da maior corrente diferencial i_D , o algoritmo calcula, por meio da equação (2.11) um vetor contendo N amostras de correntes de operação, $i_{op,k}$, da mesma forma como no método proposto na referência (TIFERES; MANASSERO JR., 2022). A corrente i_D é, portanto, o valor máximo do vetor \mathbb{I}_{op} , que contém as amostras $i_{op,k}$, conforme a equação (3.11).

$$i_D = \text{Máximo}(\mathbb{I}_{op}) = \text{Máximo}\{|i_{L,1} - i_{R,1}| \cdots |i_{L,N} - i_{R,N}|\} \quad (3.11)$$

A segunda condição de *trip* do algoritmo é verificada, desse modo, se i_D superar um valor mínimo i_M , que corresponde a uma corrente de *pick-up*. O ajuste de i_M adotado e recomendado, obtido a partir de uma série de testes do algoritmo com faltas simuladas, é o de 30% da corrente nominal secundária dos TCs (que, para LTs da Rede Básica (RB), vale tipicamente 5,0 [A]). Comenta-se, também, que podem ser considerados ajustes diferentes para i_M . Entretanto, quanto maior o valor dessa corrente de *pick-up*, maiores serão os tempos de detecção das faltas internas e maior será a segurança do método, e vice-versa.

A condição de detecção de faltas envolvendo as correntes i_D e i_M é fundamental para aumentar a segurança do método de proteção proposto, uma vez que, mesmo em condições de operação normal da LT protegida ou de faltas externas, fatores como correntes de carregamento capacitivas, erros de medição entre os TCs e desalinhamento entre as amostras podem causar diferenças entre as correntes dos terminais da linha (HOROWITZ; PHADKE, 2014), que podem por consequência afetar os valores de correlação. Além disso, esta condição de *trip* garante o funcionamento correto do algoritmo durante sua inicialização, em que os *buffers* de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R encontram-se preenchidos com zeros, e durante as primeiras aquisições de valores amostrados, em que os vetores vão sendo preenchidos.

Vale comentar, de forma complementar, que critérios de corrente diferencial mínima são encontrados na maioria de algoritmos de proteção piloto e diferencial existentes na bibliografia. Como na solução proposta, esses critérios são tipicamente empregados como verificações adicionais para a tomadas de decisão de *trip*, designadas para aumentar a segurança dos métodos de proteção.

A figura 3.3 apresenta, portanto, o fluxograma da lógica de *trip* do algoritmo proposto, contemplando as etapas de aquisição e intercâmbio de amostras dos terminais, atualização dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , cálculo da BWMC e verificação das duas condições discutidas.

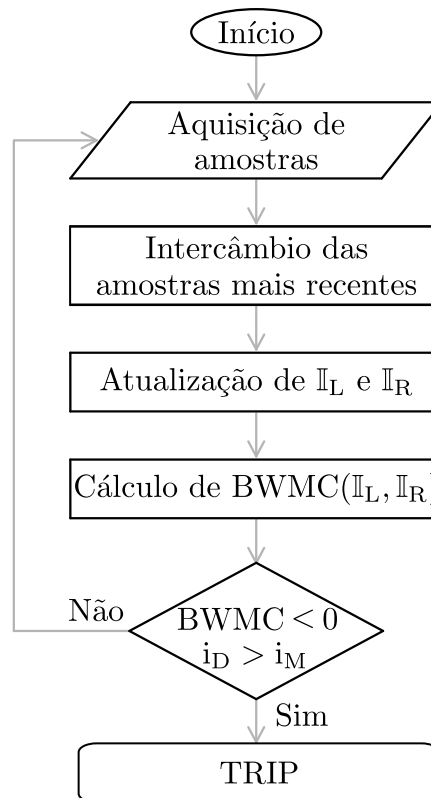


Figura 3.3: Lógica de *trip* do algoritmo proposto

O método executa a lógica apresentada na figura para as três fases da LT protegida individualmente, conforme apontado anteriormente. Como se pode observar, o algoritmo só entra no estado de *trip*, que resulta no envio do sinal de *trip* aos DJs da linha, se ambas as condições de detecção de faltas internas forem verificadas (valor de BWMC negativo e corrente diferencial máxima i_D maior do que o limite mínimo i_M).

Comenta-se também que, caso julgado necessário (aumento na sensibilidade da detecção de faltas internas, por exemplo), pode-se também utilizar valores de BWMC calculados a partir das correntes terminais de sequência zero e de sequência negativa (utilizando-se filtros de atraso fracionário, tal como em (TIFERES; MANASSERO JR., 2022)), além das correntes de fase. A utilização das correntes de sequência zero é interessante em sistemas de transmissão nos quais podem ocorrer situações de faltas internas com *outfeed*, conforme está analisado no próximo capítulo.

Vale destacar, além disso, que os únicos ajustes requeridos pelo algoritmo proposto são o tamanho N dos vetores/*buffers* circulares \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R e o limite de corrente de operação mínimo i_D , que por sua vez depende apenas da corrente secundária nominal dos TCs pertencentes à infraestrutura de proteção. Ainda assim, conforme analisado mais adiante, o valor correspondente a pelo menos meio ciclo de amostras para N é suficiente para que o algoritmo proposto apresente respostas rápidas, precisas e robustas.

Os próximos capítulos deste trabalho apresentam, portanto:

- todas as simulações realizadas que indicam a eficiência, rapidez, robustez, segurança e confiabilidade do algoritmo proposto para proteger LTs de diversas características em diferentes condições;
- os testes experimentais que corroboram e validam experimentalmente a implementação e a eficiência da solução de proteção piloto de LTs apresentada; e
- aspectos relativos à complexidade computacional e à carga de processamento do método proposto.

4 Simulações e resultados

Este capítulo apresenta os resultados e análises referentes ao desempenho do algoritmo proposto verificado em simulações, conduzidas com sinais de faltas gerados com o programa de transitórios eletromagnéticos ATP.

São apresentadas, primeiramente, as características do sistema elétrico modelado e dos casos de falta utilizados para testar o algoritmo proposto e compará-lo com todas as demais técnicas de correlação e similaridade descritas na seção 2.7 (correlações de Pearson, Spearman e Kendall e similaridades de cosseno e estrutural).

Os algoritmos foram comparados sob os pontos de vista de velocidade de detecção das faltas internas (tempos de *trip*, que são os intervalos transcorridos entre o início da falta o instante de detecção da mesma pela proteção, sem considerar o tempo de abertura dos DJs), falhas de segurança (atuação indevida em faltas externas, nas condições críticas de saturação de TCs, sinais com baixas relações sinal-ruído (RSR) e desalinhamento de amostras dos terminais) e falhas de operação (não atuação em faltas internas, sobretudo em casos de falta de alta impedância). Além disso, um algoritmo baseado na solução de proteção diferencial de linha convencional baseada em fasores também foi considerado nas comparações com o método proposto e com os demais algoritmos.

Os resultados indicam que o algoritmo apresentado é tão rápido para detectar faltas internas quanto as demais alternativas baseadas em correlação, mas que, por ser baseado na BWMC, é mais robusto para não apresentar falhas de segurança nas condições críticas, em comparação com todas as outras abordagens. Conforme mencionado anteriormente, essa robustez, que é consequência da utilização de uma medida de correlação baseada essencialmente nas medianas dos conjuntos de dados, é a principal vantagem do algoritmo proposto em relação às demais alternativas. Além disso, o método apresentado também se mostrou capaz de identificar todas as faltas internas corretamente.

Em seguida, foram verificados os efeitos causados por variações na frequência de amostragem e na resistência de falta nos tempos de *trip*. Por fim, o método foi simulado em uma condição com oscilação de potência em um sistema de máquina síncrona (MS) contra barra infinita, em mais de 6500 casos de faltas internas adicionais, divididos em

dois blocos de linhas pertencentes ao SIN, com níveis de tensão variando desde 138 a 765 [kV], e em um caso contendo faltas simultâneas. Também, foram analisadas as influências das condições de faltas internas com *weak infeed* e *outfeed*, da componente unidirecional amortecida presente nas correntes de falta e da modelagem da linha protegida (parâmetros variantes e invariantes com a frequência) nas respostas do algoritmo.

Vale a pena comentar, também, que o sistema elétrico de 500 [kV] utilizado para a avaliação do algoritmo BWMC proposto na condição de *weak infeed* é o mesmo utilizado para validar o algoritmo de proteção diferencial baseado em inferência Bayesiana (TIFERES; MANASSERO JR., 2022), o que possibilitou a realização de uma comparação entre a velocidade de detecção de faltas entre o método proposto nesta pesquisa e o desenvolvido e apresentado em tal referência.

4.1 Descrição do sistema e das faltas simuladas

A figura 4.1 ilustra o diagrama unifilar do principal sistema de transmissão (440 [kV] e 60 [Hz]) modelado no ATP para a criação e simulação de casos de falta.

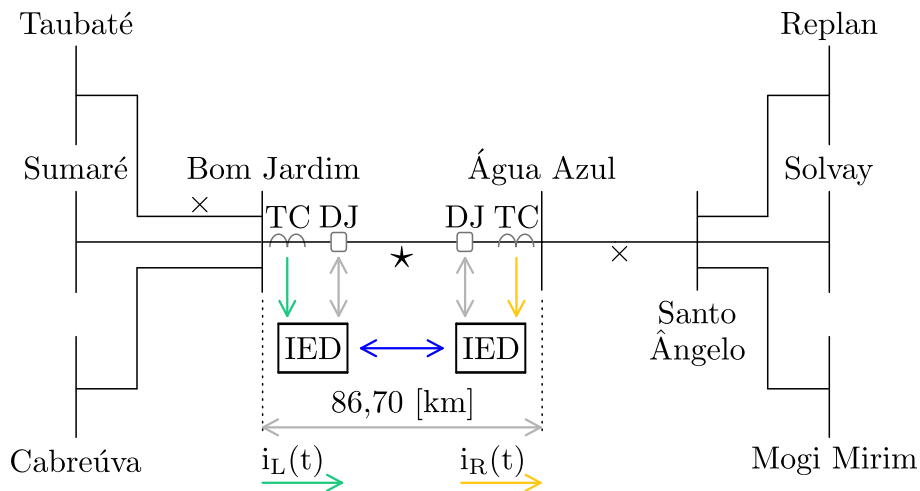


Figura 4.1: Diagrama unifilar do sistema de 440 [kV] modelado

Esse sistema encontra-se localizado no Estado de São Paulo, e possui tanto SEs de transmissão (Taubaté, Sumaré, Cabreúva, Bom Jardim, Água Azul, Santo Ângelo e Mogi Mirim) como SEs industriais (Replan e Solvay). Essa rede foi escolhida para a geração dos casos de falta, com os quais foram conduzidos os testes iniciais do algoritmo, devido a sua importância na malha de transmissão da RB de São Paulo.

Conforme indicado, a LT protegida, cujo comprimento é de 86,70 [km], é a que conecta a SE Bom Jardim à SE Água Azul. Os TCs dos terminais da linha protegida possuem

relação de transformação de corrente de 1200:5 e núcleo de material ferromagnético com característica não-linear modelada de acordo com a referência (FOLKERS, 1999). As polaridades dos TCs são consideradas de forma que as correntes secundárias sejam medidas com o sentido indicado na figura.

A modelagem de todas as torres desse sistema considera a disposição geométrica e as características ilustradas na figura 4.2. Para todas as LTs, foi utilizado o modelo de parâmetros variantes com a frequência, conforme (MARTÍ, 1982). A flecha dos condutores é de 9,92 [m], enquanto a flecha dos cabos OPGW é de 8,97 [m]. Os espaçamentos entre os condutores de cada fase nos *bundles* quadrados, por sua vez, valem 40 [cm].

A figura 4.3, em complemento, apresenta uma fotografia de autoria própria, registrada no dia 07/02/2022, de uma das torres da LT Santo Ângelo - Solvay, que pertence à rede modelada. A tabela 4.1, por sua vez, apresenta os comprimentos de cada LT.

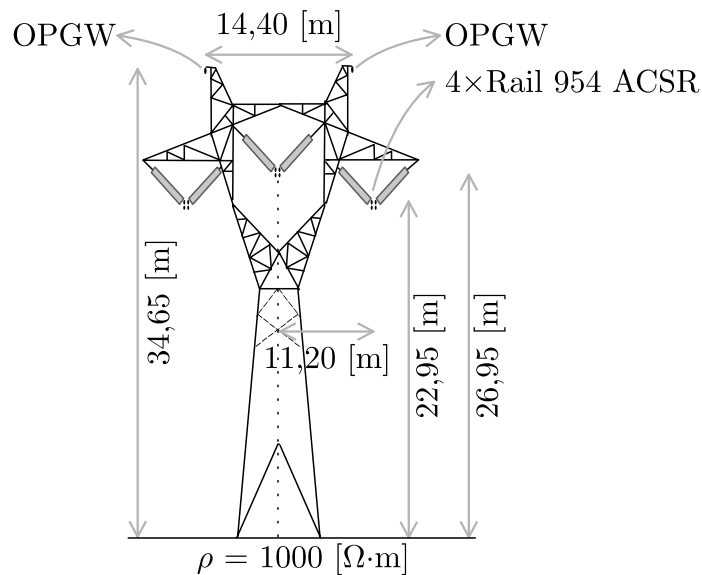


Figura 4.2: Disposição geométrica e características das torres do sistema

Tabela 4.1: Comprimentos das linhas do sistema modelado

LT	Comprimento [km]
Taubaté - Bom Jardim	152,8
Sumaré - Bom Jardim	47,20
Cabreúva - Bom Jardim	24,00
Bom Jardim - Água Azul	86,70
Água Azul - Santo Ângelo	32,20
Santo Ângelo - Replan	138,0
Santo Ângelo - Solvay	28,50
Santo Ângelo - Mogi Mirim	182,0



Figura 4.3: Fotografia de uma das torres pertencentes à rede modelada

Para cada barra de fronteira (que se conecta ao restante do SIN) do sistema modelado (Taubaté, Sumaré, Cabreúva, Replan, Solvay e Mogi Mirim), foram calculadas, com o *software* Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS), para as potências de curto-circuito monofásico ($S_{1\phi}$) e trifásico ($S_{3\phi}$) dos equivalentes de Thévenin. As tensões em cada equivalente, por outro lado, foram determinadas com o *software* Análise de Redes em Regime Permanente (ANAREDE), considerando-se seis condições distintas de carga.

As potências de curto-circuito monofásico ($S_{1\phi}$) e trifásico ($S_{3\phi}$) de cada um dos equivalentes alojados nas barras de fronteira do sistema, calculadas com a base de curto-circuito do ano 2022 do conjunto de casos do PAR/PEL 2021-2025, desenvolvidos pelo ONS, são:

- Taubaté: $S_{1\phi} = 7,88\angle 85,5^\circ$ [GVA] e $S_{3\phi} = 7,89\angle 87,0^\circ$ [GVA];
- Sumaré: $S_{1\phi} = 5,81\angle 83,0^\circ$ [GVA] e $S_{3\phi} = 5,96\angle 84,8^\circ$ [GVA];
- Cabreúva: $S_{1\phi} = 8,54\angle 85,7^\circ$ [GVA] e $S_{3\phi} = 7,27\angle 86,1^\circ$ [GVA];
- Replan: $S_{1\phi} = 2,37\angle 85,0^\circ$ [GVA] e $S_{3\phi} = 2,19\angle 84,9^\circ$ [GVA];
- Solvay: $S_{1\phi} = 3,20\angle 84,6^\circ$ [GVA] e $S_{3\phi} = 3,06\angle 86,7^\circ$ [GVA]; e
- Mogi Mirim: $S_{1\phi} = 2,66\angle 83,6^\circ$ [GVA] e $S_{3\phi} = 2,81\angle 83,5^\circ$ [GVA].

As tensões (em valores por unidade em relação à base de 440 [kV]) nos equivalentes em cada condição de carga (numeradas de 1 a 6), por sua vez, encontram-se apresentadas na tabela 4.2. Foram considerados, para a determinação dessas tensões, os cenários de inverno (I) e verão (V), nas situações de carga pesada (P), média (M) e leve (L), dos casos de referência do PAR/PEL 2021-2025.

Tabela 4.2: Tensão dos equivalentes em cada condição de carga

Barra	I-P (1)	I-M (2)	I-L (3)	V-P (4)	V-M (5)	V-L (6)
Taubaté	1,029∠-41°	1,027∠-34°	1,042∠-24°	1,020∠-28°	1,029∠-30°	1,033∠-16°
Sumaré	1,016∠-37°	1,021∠-32°	1,004∠-22°	1,023∠-29°	1,033∠-32°	1,009∠-19°
Cabreúva	1,027∠-40°	1,030∠-35°	1,004∠-23°	1,025∠-33°	1,023∠-36°	1,006∠-21°
Replan	1,035∠-36°	1,027∠-31°	1,027∠-21°	1,020∠-29°	1,011∠-31°	1,040∠-19°
Solvay	1,033∠-40°	1,032∠-35°	1,009∠-22°	1,020∠-34°	1,016∠-37°	1,023∠-21°
M. Mirim	1,019∠-37°	1,023∠-32°	1,041∠-21°	1,024∠-28°	1,006∠-31°	1,035∠-19°

As faltas foram simuladas nas linhas Bom Jardim - Água Azul (faltas internas), Bom Jardim - Taubaté (faltas externas) e Água Azul - Santo Ângelo (faltas externas), conforme indicado respectivamente com \star (internas) e \times (externas) na figura 4.1. Nas três linhas, foram consideradas faltas fase-terra AN, faltas dupla-fase BC, faltas dupla-fase-terra BCN e faltas trifásicas ABC.

Na linha protegida, Bom Jardim - Água Azul, os pontos de aplicação das faltas internas encontram-se a 14,45 [km] ($1/6$), 28,90 [km] ($2/6$), 43,35 [km] ($3/6$), 57,80 [km] ($4/6$) e 72,25 [km] ($5/6$ do comprimento da linha) da SE Bom Jardim.

Na LT Bom Jardim - Taubaté, as faltas externas foram aplicadas a 12,73 [km] ($1/12$ do comprimento da linha) da SE Bom Jardim. Na linha Água Azul - Santo Ângelo, por fim, o ponto de aplicação das faltas externas encontra-se a 8,05 [km] ($1/4$ do comprimento da linha) da SE Água Azul.

As faltas AN e BCN foram simuladas com resistências de falta de 0,1 [Ω], 1 [Ω], 10 [Ω], 100 [Ω] e 1000 [Ω] (configurando as condições de faltas de alta impedância). As faltas BC e ABC, por não envolverem a terra, foram simuladas apenas com resistências de falta de 0,1 [Ω], 1 [Ω] e 10 [Ω]. Os instantes de início das faltas foram $t = 0,02$ e $t = 0,03$ [s]. A duração de cada caso, por outro lado, foi de 0,10 [s].

Os sinais de corrente dos terminais da LT protegida em todos os casos foram reamostrados para a frequência de amostragem de 3,84 [kHz], correspondente a 64 amostras por ciclo de 60 [Hz].

No total, para os testes iniciais do algoritmo proposto e para as comparações com as demais alternativas baseadas em correlação e similaridade encontradas na literatura e com a solução diferencial fasorial convencional, foram gerados 1200 casos de falta, sendo 960 casos de faltas internas à LT protegida e 240 casos de faltas externas.

Além das faltas originais, foram consideradas, também, as condições críticas de:

- **saturação de TCs:** os TCs das SEs Bom Jardim e Água Azul tiveram os seus respectivos *burdens* dos secundários ajustados propositalmente para que os sinais de corrente do secundário apresentassem saturações severas.

Foram simulados, nesse contexto, 2400 casos, sendo 1200 com o TC da SE Bom Jardim saturado e o TC da SE Água Azul normal e 1200 com o TC da SE Bom Jardim normal e o TC da SE Água Azul saturado.

Vale comentar que a saturação de TCs é uma condição consideravelmente crítica pois, em faltas externas, pode produzir diferenças significativas entre as correntes dos terminais, que podem provocar falhas de segurança;

- **sinais de corrente com ruídos de baixa RSR:** os sinais das correntes dos terminais oriundos das simulações de todos os 1200 casos foram somados com valores de ruído digital aleatórios, de modo que os sinais resultantes dos 1200 casos novos apresentassem relações sinal-ruído (RSR), calculadas a partir da relação entre as amplitudes dos sinais de corrente originais e dos valores aleatórios de ruído em escala logarítmica, de em média 20 [dB].

Foram consideradas dois conjuntos diferentes de valores aleatórios de ruído, sendo um conjunto para cada terminal. Dessa forma, os ruídos em cada terminal possuem amplitudes similares, porém valores diferentes, o que provoca diferenças entre as correntes. Para as três fases de cada terminal, e em todos os casos, foi utilizado o mesmo conjunto de valores de ruído.

Destaca-se que os sinais de corrente com altos níveis de ruído configuram condições críticas pois produzem diferenças entre as amostras que podem, assim como a saturação de TCs, provocar falhas de segurança em faltas externas, dependendo da lógica e dos critérios de *trip* do método de proteção empregado; e

- **desalinhamento entre amostras dos terminais:** todos os 1200 casos de falta gerados foram simulados também em condições de desalinhamento entre as amostras dos terminais, isto é, em situações em que as diferenças entre os instantes das n -ésimas amostras dos terminais, $t_{L,n}$ e $t_{R,n}$, são consideráveis e fazem com que as

amostras coletadas não sejam alinhadas corretamente, podendo impor adversidades aos algoritmos de proteção por canal piloto.

Conforme mencionado anteriormente, os algoritmos de sincronismo pingue-pongue utilizados em SEs modernas são adaptativos. Desse modo, tais métodos são capazes de corrigir as diferenças entre os instantes de aquisição, alterando os números das amostragens n , para que as diferenças sejam sempre as menores possíveis. Logo, as diferenças entre os instantes de aquisição das n -ésimas amostras em cada terminal da LT, na prática, são sempre inferiores a um período de amostragem T_a .

Vale comentar também que, idealmente, as diferenças entre os instantes de amostragem são substancialmente inferiores a T_a , de modo que as amostras estejam alinhadas corretamente. No entanto, é possível que, em eventuais casos, as diferenças entre os instantes de n -ésimas amostragens em cada terminal sejam significativas, provocando os desalinhamentos. Nesse contexto, tem-se que as condições mais críticas possíveis, tendo em vista o funcionamento dos algoritmos de pingue-pongue, são as em que as diferenças entre $t_{L,n}$ e $t_{R,n}$ são iguais a $T_a/2$.

Ainda assim, como os valores são coletados nos mesmos instantes nas simulações do ATP, condições de desalinhamento com diferenças não múltiplas de T_a não são possíveis de serem simuladas em uma mesma simulação.

Logo, os casos com desalinhamento mais crítico foram simulados considerando que, em todas as faltas e nas três fases da LT, as diferenças entre as n -ésimas amostragens são iguais a T_a . Cabe notar que condições assim ocorreriam caso o método de pingue-pongue em si apresentasse falhas graves e seriam ainda mais críticas do que as de desalinhamento de $T_a/2$. Os desalinhamentos são críticos pois fazem com que sejam comparados valores medidos em instantes diferentes, podendo provocar situações de *trip* indevido sobretudo em faltas externas.

Desse modo, as próximas seções apresentam os resultados e análises referentes aos tempos de *trip* e à robustez do algoritmo proposto nas condições críticas, incluindo também as faltas de alta impedância internas, em comparação com as demais técnicas de correlação e similaridade e com o método diferencial convencional baseado em fasores.

Tanto o algoritmo proposto como os métodos baseados nas demais métricas de correlação foram testados considerando os tamanhos N de um quarto de ciclo (QC), meio ciclo (MC) e um ciclo completo (CC) para os *buffers* de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R . Tendo em vista que a frequência de amostragem é de 64 amostras por ciclo, os vetores com os tamanhos de QC, MC e CC possuem respectivamente $N = 16$, $N = 32$ e $N = 64$ valores amostrados.

Além disso, vale comentar que os algoritmos baseados nas demais técnicas de correlação e similaridade foram considerados com a mesma lógica do método proposto (figura 3.3), mas substituindo a BWMC pela métrica de correlação correspondente. Para todos os métodos testados, a corrente diferencial mínima de *pick-up*, i_M , foi ajustada para 1,50 [A], que corresponde a 30% da corrente secundária dos TCs.

A solução diferencial fasorial convencional (referenciada deste ponto em diante como “Convencional”), por sua vez, calcula os fasores \dot{I}_L e \dot{I}_R por meio das TDFs de MC e de CC. O valor do *slope* K_{SL} foi ajustado com o valor típico de 0,50 (ZHENG et al., 2020), e o algoritmo detecta a falta se a desigualdade (2.7) for verificada e a condição de i_D e i_M for satisfeita.

Todos os algoritmos (proposto e existentes) foram simulados em todos os casos normais (1200 faltas), todos os casos com saturação dos TCs (2400 faltas), todos os casos com os mesmos ruídos nas correntes dos terminais (1200 faltas) e todos os casos com o desalinhamento de amostras (1200 faltas). Foram consideradas apenas as correntes das fases da LT protegida nessas simulações, para todos os algoritmos avaliados.

Os resultados de tempos de *trip* e robustez do método apresentado e dos existentes encontram-se, dessa forma, apresentados a seguir.

4.2 Velocidade de detecção de faltas internas

A tabela 4.3 apresenta os tempos de *trip* médios e máximos, em milissegundos, para todos os algoritmos (**proposto** e existentes), em todos os casos de faltas normais (960 faltas internas), considerando-se as três fases da LT protegida e para os três tamanhos dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R testados (QC, MC e CC).

Os tempos de *trip*, que quantificam as velocidades de detecção das faltas internas, são os intervalos de tempo transcorridos entre o início da falta e o instante em que o método de proteção detecta a falta e ativa as saídas de *trip* para os DJs alojados nas SEs dos terminais da LT protegida.

Estes resultados indicam que o algoritmo possui, para todas as faltas internas na condição normal, velocidades de detecção de faltas internas similares (diferenças de frações de milissegundos) à correlação de Pearson e à similaridade por cosseno, as quais, dentre as alternativas existentes, mostraram-se as mais rápidas, com tempos de *trip* da ordem de grandeza de alguns milissegundos.

Tabela 4.3: Tempos de *trip* médios e máximos, em [ms], de cada algoritmo

Algoritmo	(QC: N = 16)		(MC: N = 32)		(CC: N = 64)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
BWMC	0,743	7,240	1,088	8,385	2,081	16,20
Pearson	0,701	7,240	0,849	8,385	1,452	16,20
Spearman	0,967	7,240	1,845	9,323	3,905	22,08
Kendall	1,087	7,240	2,253	9,427	4,753	23,13
Cosseno	0,820	8,281	1,329	8,385	2,107	16,20
Estrutural	3,676	19,84	5,982	26,77	13,26	41,20
Convencional	—	—	2,963	9,167	7,998	16,72

Convém notar, também, que não há resultados para a solução convencional considerando o tamanho de QC, uma vez que as TDFs são computadas apenas com vetores de tamanho MC ou CC (JIN et al., 2018; IBARRA et al., 2022).

Nenhum dos algoritmos apresentou falhas de segurança (atuação indevida em casos de faltas externas) nos casos de faltas normais, isto é, sem as condições críticas de saturação de TCs, medidas com ruídos de baixa RSR e desalinhamento de amostras. Entretanto, o algoritmo de similaridade de cosseno e a solução convencional apresentaram falhas de operação (não-atuação em faltas internas) para 8 dos 120 casos de faltas internas de alta impedância, com os tamanhos de MC e CC.

Assim, o método proposto mostrou-se capaz de identificar corretamente e rapidamente todas as faltas internas, independentemente do tipo e da resistência. Todos os tempos de *trip* máximos, para todos os algoritmos e tamanhos dos vetores, foram computados em casos de faltas internas com alta impedância (resistência de 1000 $[\Omega]$).

A figura 4.4 apresenta as correntes dos terminais (fase A) e os coeficientes de BWMC calculados com os tamanhos de QC, MC e CC para os *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R em uma situação de falta interna à LT protegida. Essa falta, que se inicia em $t = 0,03$ [s], foi simulada no ponto localizado a $1/6$ do comprimento da linha protegida a partir da SE Bom Jardim, com resistência de falta de 1 $[\Omega]$ e na condição de carga (1). Os tempos de *trip* do método proposto, para esse caso, foram iguais a 0,469 [ms], 0,990 [ms] e 2,813 [ms] com os tamanhos dos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R sendo iguais a respectivamente QC, MC e CC.

É possível observar, com base na tabela 4.3 e na figura 4.4, que quanto maior o tamanho dos *buffers* contendo os valores amostrados das correntes dos terminais da LT, maiores os tempos de *trip*. Este resultado é coerente pois, conforme os vetores aumentam em tamanho, cada amostra possui um peso menor no valor de BWMC.

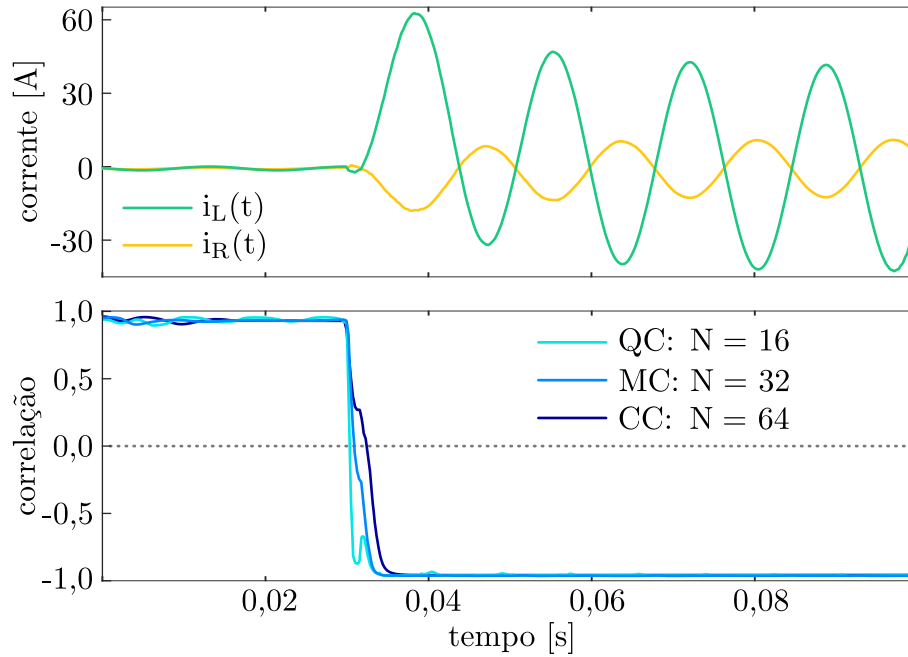


Figura 4.4: Correntes nos terminais e coeficientes de BWMC da fase A (tamanhos de QC, MC e CC) ao longo do tempo durante caso de falta AN interna

Dessa forma, quanto maior o número de amostras nos *buffers*, maior o número de amostras de correntes de falta que têm de ser coletadas para que os valores de BWMC tornem-se negativos. Entretanto, quanto maiores os *buffers*, maior a segurança do método contra situações adversas que podem provocar falhas de atuação indevida da proteção em faltas externas. Além disso, quanto maior o tamanho N dos vetores, maior a carga de processamento do método, conforme está analisado no próximo capítulo.

A tabela 4.4, por sua vez, apresenta os tempos de *trip* médios e máximos do algoritmo proposto para cada tipo de falta, considerando os 960 casos normais de faltas internas à LT protegida. Para cada caso de falta AN, foi computado um valor de tempo de *trip* (apenas fase A). Para cada caso de falta BC e BCN, foram computados dois valores (fases B e C). Para cada caso de falta ABC, por fim, foram computados três valores de tempos de *trip* (as três fases).

Tabela 4.4: Tempos de *trip* do algoritmo proposto, em [ms], para cada tipo de falta

Tipo da falta	nº de casos	(QC: N = 16)		(MC: N = 32)		(CC: N = 64)	
		Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
AN	300	1,527	7,240	1,839	6,823	3,275	15,68
BC	180	0,473	0,573	0,734	0,990	1,257	1,510
BCN	300	0,685	5,937	1,130	8,385	2,576	16,20
ABC	180	0,551	1,250	0,861	1,771	1,417	2,552

É possível observar que, para os três tamanhos dos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R considerados, o algoritmo apresenta tempos de *trip* maiores para faltas envolvendo a terra (AN e BCN). Isso ocorre pois, para essas faltas, foram considerados e simulados casos com resistências de falta de 100 e 1000 $[\Omega]$, que apresentam tempos de *trip* tipicamente maiores.

4.3 Condições críticas

Conforme discutido anteriormente, os algoritmos foram simulados também nos casos que consideram as condições críticas de saturação dos TCs (2400 casos), medidas com ruídos severos nos dois terminais (1200 casos) e desalinhamento entre as amostras dos terminais (1200 casos). Essas condições são adversas à maioria dos algoritmos de proteção piloto de linha pois fazem com que as correntes dos terminais medidas pelos IEDs sejam diferentes, o que pode provocar falhas de segurança em faltas externas.

Entretanto, vale comentar que essas condições críticas são improváveis de acontecer em situações práticas, uma vez que:

- os TCs geralmente são selecionados de maneira cuidadosa para evitar saturação por corrente alternada e pela componente unidirecional amortecida;
- os sinais provenientes da LT que são medidos pelos IEDs de proteção são geralmente filtrados apropriadamente; e
- os algoritmos de sincronismo pingue-pongue são adaptativos e operam para sempre minimizar as diferenças entre os instantes de aquisição de amostras nos terminais, que, idealmente, são substancialmente menores do que um período de amostragem.

Ainda assim, a ocorrência de uma ou mais dessas condições não pode ser desprezada, pois não são eventos impossíveis de ocorrer. Dessa forma, a análise da robustez das soluções de proteção de LT considerando tais condições é importante para garantir desempenho seguro e confiável até mesmo nas situações mais adversas.

Nesse contexto, a tabela 4.5 apresenta os números de falhas de segurança observados em cada condição crítica, para cada tamanho dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , considerando todos os algoritmos (**proposto** e existentes).

Pode-se observar que, para todas as condições críticas e tamanhos dos vetores/*buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , o algoritmo proposto apresentou robustez maior para não apresentar falhas de

segurança. Este resultado é consequência do fato previamente mencionado de que, diferentemente das técnicas de cálculo de medidas de correlação e similaridade encontradas na literatura, a BWMC é baseada nas medianas do conjuntos de dados, e logo é menos afetada por dados inconsistentes (*outliers*).

Tabela 4.5: Número de falhas de segurança para cada algoritmo e condição crítica

Algoritmo	(Saturação dos TCs)			(Ruídos de 20 [dB])			(Desalinhamento)		
	QC	MC	CC	QC	MC	CC	QC	MC	CC
BWMC	14	0	0	4	0	0	4	0	0
Pearson	38	21	4	22	19	0	23	8	0
Spearman	23	12	0	12	7	0	15	6	0
Kendall	23	13	0	11	7	0	13	6	0
Cosseno	61	0	0	8	0	0	8	6	0
Estrutural	66	41	38	50	41	37	34	33	10
Convencional	—	16	6	—	14	6	—	15	6

Os resultados indicam que, para os casos considerados, o método proposto pode ser implementado com *buffers* de pelo menos MC para garantir operação rápida, segura, eficaz e confiável até mesmo nas condições críticas (com o tamanho de QC, o algoritmo apresenta falhas de segurança em determinados casos, assim como todos os demais métodos).

As demais técnicas de correlação e similaridade, por sua vez, podem ser utilizadas com *buffers* maiores do que MC (maior carga computacional e tempos de *trip*), ou com valores diferentes (menores) do que zero para a condição principal de *trip* (figura 3.3), o que afeta os tempos de *trip* e introduz um novo ajuste, uma vez que o melhor valor de correlação mínima pode variar de acordo com a linha a ser protegida e as condições críticas, ou até mesmo com critérios adicionais de confirmação do *trip*, como no algoritmo apresentado em (TIFERES; MANASSERO JR., 2022), caso implementadas com os vetores de amostras com tamanho de MC para discriminar as faltas internas das externas nessas condições desafiadoras. No entanto, critérios adicionais de *trip* provocam atrasos na velocidade de detecção das faltas internas e introduzem mais ajustes de proteção.

Quanto à solução convencional, é possível observar que, do ponto de vista de tempos de *trip* (tabela 4.3), a utilização dos vetores de amostras com MC para as TDFs em relação ao uso de \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com CC pode ser vantajosa pois resulta em tempos de *trip* menores. Entretanto, a utilização de vetores com CC é mais segura, principalmente nos casos de saturação e desalinhamento. Ainda assim, seriam necessários critérios de *trip* adicionais e/ou valores maiores de *slope* para aumentar a segurança, tanto com MC como com CC, o que, por outro lado, também atrasa a detecção de faltas internas.

Desse modo, fica evidente que, em comparação com as alternativas consideradas, o algoritmo proposto possui robustez maior para não apresentar falhas de segurança nas condições adversas e velocidade de detecção de faltas internas similar àquelas apresentadas pelas soluções existentes mais rápidas (correlação de Pearson e similaridade de cosseno).

A figura 4.5, nesse contexto, ilustra as correntes terminais da fase B e os respectivos coeficientes de BWMC, correlação de Pearson e similaridade estrutural (calculados com MC) para uma falta BCN externa, na linha Água Azul - Santo Ângelo, no instante $t = 0,02$ [s] e na condição de carga (6), em que o TC da SE Água Azul apresenta saturações severas durante o amortecimento da componente aperiódica resultante do transitório da falta. Nesse caso, é possível observar que os valores de BWMC, diferentemente dos de correlação de Pearson e similaridade estrutural, não vão à zona de *trip* (valores negativos) em nenhum instante. O menor valor de $BWMC(I_L, I_R)$ da fase B nesse caso é 0,2273.

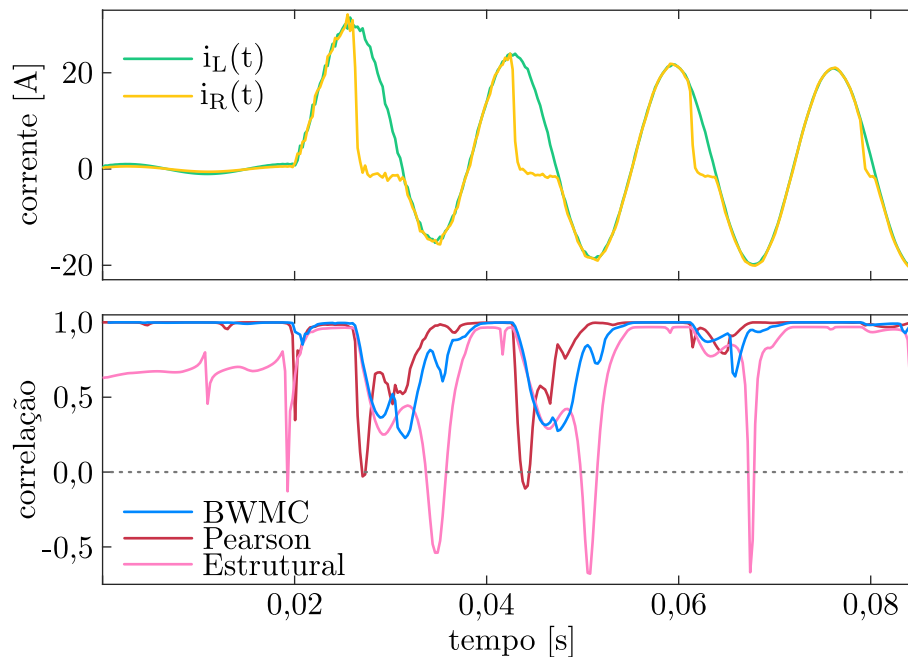


Figura 4.5: Correntes nos terminais (fase B) e coeficientes de BWMC, correlação de Pearson e similaridade estrutural (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta externa com saturação de TC

A figura 4.6, por sua vez, apresenta as correntes terminais da fase C e os respectivos coeficientes de BWMC e correlações de Spearman e Kendall (calculados com *buffers* de MC) ao longo do tempo para uma falta BCN externa, ocorrida na linha Água Azul - Santo Ângelo, na condição de carga (3) e com início em $t = 0,02$ [s], em que as correntes dos terminais apresentam ruídos significativos com RSR de 20 [dB].

É possível observar que, mesmo com os ruídos severos existentes nos sinais de corrente nesse caso, os valores de BWMC calculados com MC não se tornam negativos em

nenhum momento, diferentemente das correlações de Spearman e Kendall. O menor valor de $BWMC(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ da fase C nesse caso é 0,0667.

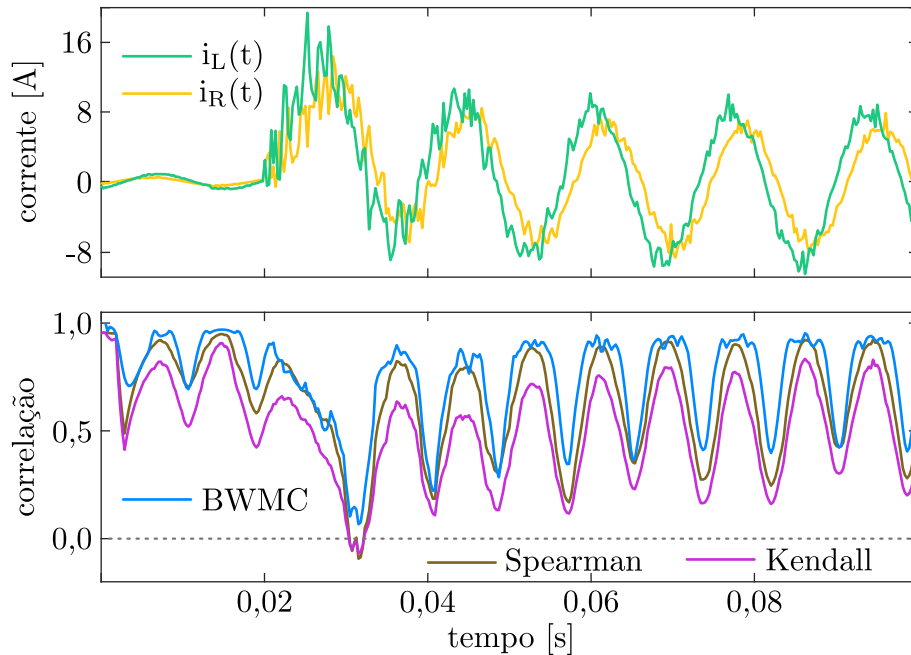


Figura 4.6: Correntes nos terminais (fase C) e coeficientes de BWMC, correlação de Spearman e correlação de Kendall (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta externa com ruídos de 20 [dB] nos sinais

A figura 4.7, finalmente, apresenta as correntes terminais da fase C e os coeficientes de BWMC calculados com MC para uma falta BCN externa, ocorrida na linha Bom Jardim - Taubaté, na condição de carga (5), no instante $t = 0,03$ [s] e com resistência de $0,1$ [Ω], em que as correntes dos terminais se encontram desalinhadas.

Neste caso, todos os demais algoritmos aplicados com MC apresentaram falhas de segurança na fase C, por conta do transitório de início da falta em conjunto com o desalinhamento imposto e com as correntes capacitivas que, na pré-falta, provocaram uma defasagem de aproximadamente 53° entre as correntes dos terminais. Os valores de todas as demais técnicas de correlação ao longo do tempo não foram representados para não sobrecarregar visualmente a figura.

No exato instante ($0,030469$ [s]) em que os outros algoritmos detectam a falta externa como interna de maneira equivocada, a corrente diferencial instantânea i_D da fase C é $3,944$ [A]. No entanto, o valor da BWMC é de $0,1547$, conforme indicado na figura 4.7, de modo que o algoritmo proposto não vai ao estado de *trip*. Os valores de correlação de Pearson, Spearman e Kendall, similaridade de cosseno e estrutural nesse instante, por outro lado, são respectivamente iguais a $-0,2516$, $-0,0938$, $-0,0242$, $-0,1217$ e $-0,0227$.

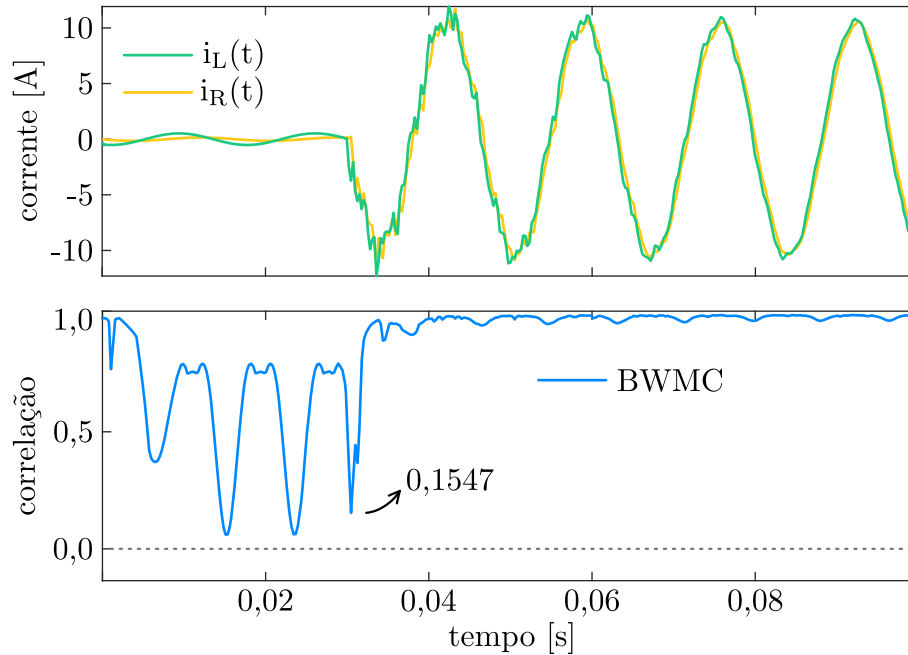


Figura 4.7: Correntes nos terminais (fase C) e coeficientes de BWMC (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta externa com desalinhamento, em que os outros algoritmos apresentaram falha de segurança

Conforme discutido previamente, as condições de saturação dos TCs, sinais de corrente com ruídos severos e desalinhamento entre amostras potencializam situações em que os métodos existentes podem apresentar falhas de segurança em casos de faltas externas à LT protegida. Entretanto, faltas internas de alta impedância também podem ser críticas pois, como as magnitudes das correntes de falta tipicamente são similares em ordem de grandeza às correntes de carga, falhas de operação podem vir a ocorrer.

Vale comentar que, em linhas com tensão de RB (maior ou igual a 230 [kV]), faltas com resistência da ordem de 1000 [Ω] são improváveis. Ainda assim, faltas dessa natureza podem ocorrer, por exemplo, em situações de condutor rompido em solos com alta resistividade e faltas para a terra envolvendo árvores ou isolação danificada (TEIMOURZADEH et al., 2021), de forma que também é importante analisar o desempenho de algoritmos de proteção nessa condição.

De acordo com o mencionado na seção anterior deste capítulo, o algoritmo proposto mostrou-se capaz de detectar todas as faltas internas de alta impedância (120 casos com faltas internas com resistência de 1000 [Ω]) com rapidez e eficiência. Entretanto, o algoritmo baseado na similaridade de cosseno (e a solução diferencial convencional) apresentou 8 falhas de operação, tanto com os *buffers* com tamanho de MC como de CC, em casos de faltas de alta impedância.

Em todas as faltas de alta impedância em que o algoritmo baseado na similaridade de cosseno não detectou a falta corretamente, a defasagem entre os sinais das correntes terminais durante a falta foi inferior a 90° , de forma que o valor da similaridade de cosseno, que é o cosseno da defasagem, manteve-se positivo. Entretanto, tanto a BWMC como as demais correlações apresentaram, em determinados instantes, valores negativos, possibilitando a detecção correta de todas essas faltas.

Nesse contexto, a figura 4.8 apresenta as correntes dos terminais da fase B e os respectivos coeficientes de BWMC e similaridade de cosseno (calculados com MC) ao longo do tempo, para uma falta BCN de alta impedância ($1000 \text{ } [\Omega]$) a $14,45 \text{ } [\text{km}]$ da SE Bom Jardim, na condição de carga (6) e que se inicia em $t = 0,02 \text{ } [\text{s}]$. Dentre todas as faltas de alta impedância testadas, a apresentada nessa figura foi a mais crítica, uma vez que ela resultou na menor defasagem entre as correntes dos terminais (aproximadamente 76°).

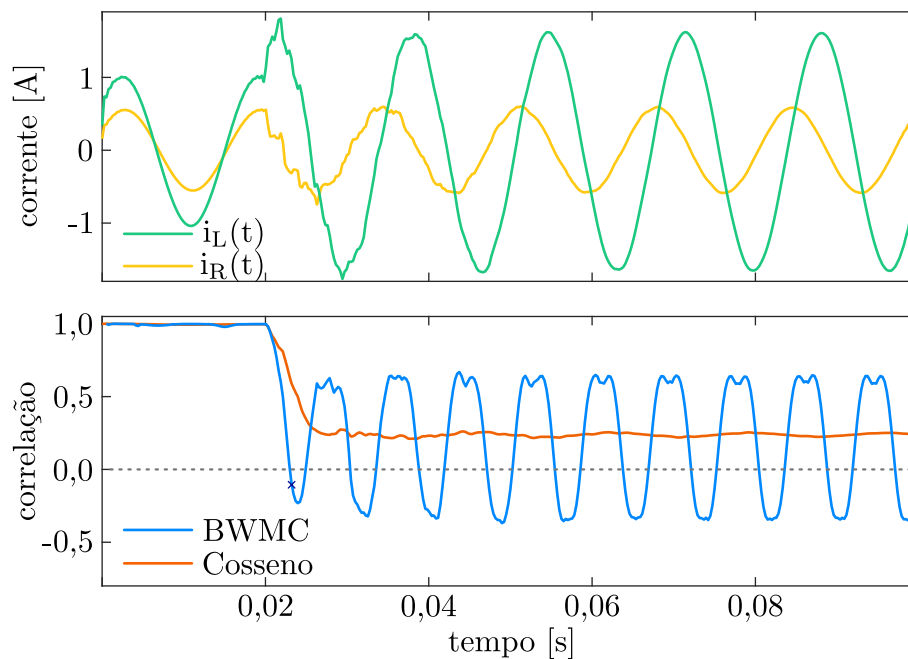


Figura 4.8: Correntes nos terminais (fase B) e coeficientes de BWMC e de similaridade de cosseno (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta interna com resistência de $1000 \text{ } [\Omega]$ e defasagem de 76° entre os sinais

É possível observar que as correntes de falta são similares, em amplitude, às correntes de carga. Além disso, nota-se que os valores de BWMC oscilam ao longo do tempo após o início da falta, assumindo tanto valores positivos como valores negativos. Ainda assim, no instante de *trip* ($0,023177 \text{ } [\text{s}]$), indicado com \times , o valor de $\text{BWMC}(I_L, I_R)$ da fase B é igual a $-0,0928$ e a corrente diferencial instantânea i_D da fase B é $1,609 \text{ } [\text{A}]$, permitindo que a falta seja corretamente detectada pelo algoritmo após $3,177 \text{ } [\text{ms}]$.

Vale comentar, em complemento, que as demais medidas de correlação também apresentam comportamento oscilatório nesse caso. Além disso, o valor de BWMC permanece negativo por mais de 1,5 [ms] após o *trip*, de forma que a falta ainda seria detectada rapidamente mesmo se fosse empregado um critério de confirmação com um temporizador de até esse intervalo. Ainda assim, para o algoritmo proposto com MC, nos casos simulados, não se fizeram necessários quaisquer critérios adicionais, pois mesmo nas faltas externas nas condições críticas, os coeficientes de BWMC não tornaram-se negativos.

Quanto ao método baseado na similaridade por cosseno, por outro lado, é possível notar que os valores não entram na zona de detecção da falta (valores de correlação menores do que zero) em nenhum momento, sendo que isso ocorre pois a defasagem entre os sinais de corrente dos terminais imposta pela falta é inferior a 90° . Nesse caso específico, os valores da similaridade de cosseno aproximam-se de $\cos(76^\circ)$, que vale $\approx 0,24$.

Dessa forma, para que faltas de alta impedância como esta sejam detectadas pela similaridade de cosseno, o valor de correlação mínimo de falta do critério de *trip*, representado na desigualdade (3.9), deve ser substituído para um valor maior do que zero. Entretanto, vale destacar que enquanto um maior valor de correlação mínima de falta resulta em tempos de *trip* mais rápidos, também pode provocar falhas de segurança adicionais nas condições de saturação, ruídos e desalinhamento.

A figura 4.9, por sua vez, apresenta as correntes dos terminais da fase C e os respectivos coeficientes de BWMC (calculados com MC) para uma falta BCN de alta impedância (1000 [Ω]) a 72,25 [km] da SE Bom Jardim, na condição de carga (4) e com início em $t = 0,02$ [s] em que, diferentemente do caso anterior, a defasagem existente entre os sinais de corrente dos terminais durante a falta é de aproximadamente 150° . Pode observar que, nesse caso, os valores de BWMC são sempre negativos durante a falta. No instante de *trip* (0,020833 [s]), o valor de $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ da fase C é igual a -0,1814 e a corrente diferencial instantânea i_D da fase C é 1,642 [A], de forma que o tempo de *trip* é de 0,833 [ms].

É possível observar que, quando a defasagem entre os sinais de corrente dos terminais da LT é de 150° , a oscilação dos coeficientes de BWMC, que são sempre negativos durante a falta, é mais atenuada do que no caso em que a defasagem é de 76° . Vale comentar que o valor da defasagem imposta pela falta aos sinais de corrente dos terminais, por sua vez, depende de fatores como a localização da falta, a condição de carga na pré-falta e as potências de curto-circuito do sistema. Ainda assim, em ambos os casos ilustrados e em todos os demais casos testados, o algoritmo se mostrou capaz de detectar faltas internas de alta impedância corretamente.

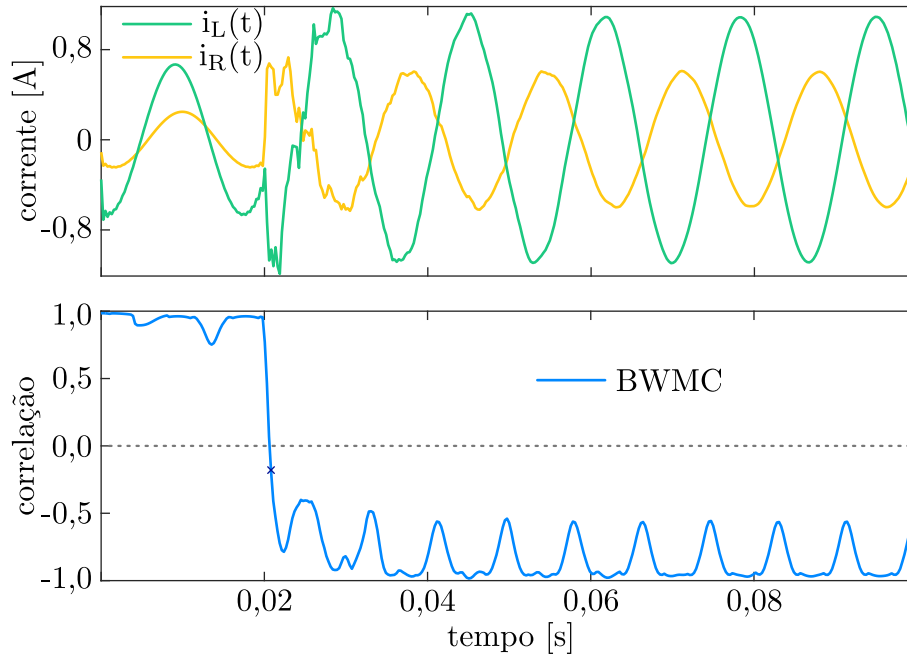


Figura 4.9: Correntes nos terminais (fase C) e coeficientes de BWMC (calculados com MC) ao longo do tempo durante caso de falta interna com resistência de $1000 \text{ } [\Omega]$ e defasagem de 150° entre as correntes dos terminais

Além disso, as oscilações nos valores de BWMC para uma mesma defasagem ocorrem pois, dados dois sinais senoidais $i_L(t)$ e $i_R(t)$, com fases iguais a δ_L e δ_R respectivamente, os valores de BWMC com MC variam com as fases de cada sinal, mesmo que a diferença entre δ_L e δ_R seja constante.

No caso do algoritmo de proteção proposto, por mais que a defasagem entre os sinais seja aproximadamente constante durante uma falta (após o amortecimento da componente contínua), as fases dos *buffers* de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R variam, no caso de 64 amostras por ciclo, $5,625^\circ$ a cada nova amostragem e atualização dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R (amostras mais recentes substituem as mais antigas).

Nesse contexto, a figura 4.10 apresenta o comportamento dos coeficientes da BWMC utilizada no algoritmo proposto nesta pesquisa calculados com MC (64 amostras por ciclo) em função das fases δ_L e δ_R de dois sinais puramente senoidais quaisquer, $i_L(t)$ e $i_R(t)$.

Vale destacar que os coeficientes de BWMC são iguais a 1 em todas as situações em que as fases δ_L e δ_R são iguais entre si (defasagem nula, $\delta_L = \delta_R$) e são iguais a -1 em todos os casos em que a diferença entre δ_L e δ_R é de 180° , independentemente das amplitudes dos sinais senoidais $i_L(t)$ e $i_R(t)$.

Além disso, comenta-se que comportamentos semelhantes podem ser observados para as correlações de Pearson, Spearman e Kendall.

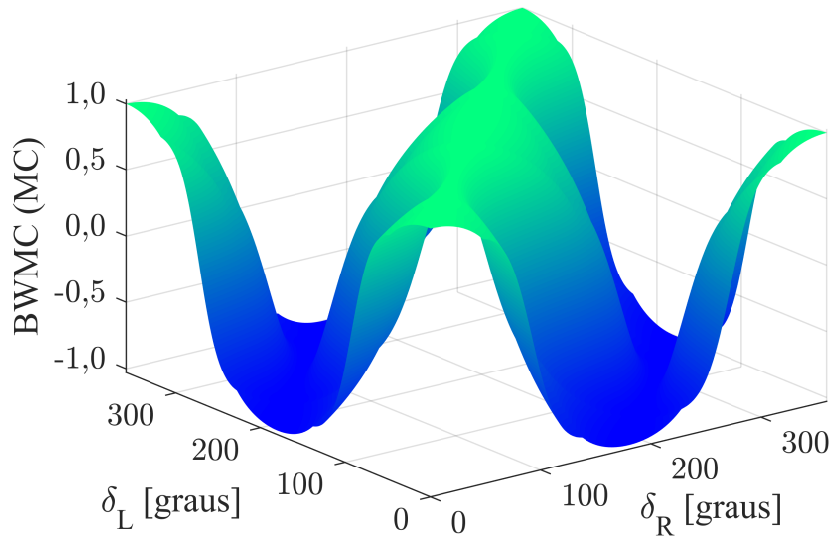


Figura 4.10: Comportamento dos coeficientes de BWMC calculados com janelas de MC em função das fases δ_L e δ_R de dois sinais senoidais $i_L(t)$ e $i_R(t)$

A tabela 4.6, por fim, apresenta os tempos de *trip* médios e máximos do algoritmo proposto para todas as 960 faltas internas nas condições de saturação dos TCs, sinais de corrente dos terminais com ruídos de 20 [dB] e desalinhamento entre as amostras.

Tal como nas faltas normais, a solução apresentada nesta pesquisa detectou todas as faltas internas (inclusive as de alta impedância) corretamente, em todas as condições.

Tabela 4.6: Tempos de *trip* do algoritmo proposto, em [ms], em cada condição crítica

Condição	(QC: N = 16)		(MC: N = 32)		(CC: N = 64)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Sat. do TC (Bom Jardim)	0,743	7,240	1,094	9,166	2,087	23,13
Sat. do TC (Água Azul)	0,744	7,240	1,100	9,166	2,089	16,35
Ruídos de 20 [dB]	0,725	8,906	1,099	9,427	2,140	43,28
Desalinhamento	0,899	7,500	1,279	9,687	2,302	16,72

Comparando os resultados do algoritmo nessas condições com os resultados nos casos normais (tabela 4.3), é possível observar que a condição que mais afeta os tempos de *trip* médios é a de desalinhamento entre amostras.

Essa condição fez com que os tempos de *trip* médios aumentassem, em relação às faltas normais, 0,156 [ms] (aumento de 21%), 0,191 [ms] (aumento de 17,6%) e 0,221 [ms] (aumento de 10,6%) para o algoritmo munido com vetores de amostras de tamanhos QC, MC e CC, respectivamente.

Ainda assim, pode-se notar que o método proposto, sobretudo com o tamanho de MC (que se mostrou eficiente para diferenciar faltas internas de faltas externas em todas as condições) continua sendo rápido para detectar quaisquer faltas internas, mesmo nas condições críticas consideradas.

Dessa forma, todos os resultados e análises das duas últimas seções indicam que:

- o algoritmo proposto é tão rápido para detectar faltas internas à LT protegida quanto as soluções encontradas na bibliografia que se mostraram mais rápidas (correlação de Pearson e similaridade de cosseno), em todas as condições testadas, apresentando tempos de *trip* médios da ordem de alguns milissegundos;
- o método proposto apresenta robustez maior do que as demais soluções (por utilizar a BWMC) para não apresentar falhas de segurança nas condições críticas de saturação, ruídos e desalinhamento utilizando vetores com tamanho de pelo menos MC. As demais alternativas necessitam ou de vetores maiores do que MC ou de critérios de confirmação adicionais com MC, que atrasariam os tempos de *trip* e aumentariam a complexidade computacional; e
- o algoritmo é capaz de detectar faltas internas com diferentes características rapidamente, mesmo nos casos críticos.

4.4 Atrasos de comunicação e processamento

Todos os tempos de *trip* obtidos nas simulações das faltas, para todos os algoritmos e em todas as condições, foram calculados a partir das diferenças entre o instante em que a saída de *trip* foi acionada pelo método de proteção e o instante de início de cada falta.

Convém observar que essa forma de calcular os tempos de *trip* não leva em conta os atrasos de comunicação do canal, isto é, considera que as amostras do outro terminal da LT estão disponíveis imediatamente após cada amostragem.

Além disso, tal maneira de computar os tempos de *trip* também não leva em consideração o tempo de processamento que algoritmo necessita para chegar, por meio da sua lógica, no estado de *trip* (figura 3.3), em que a falta interna é detectada.

Entretanto, em situações práticas, os valores amostrados em um terminal devem percorrer toda a extensão da LT protegida até chegar ao outro terminal e o método necessita executar sua lógica após a chegada de cada nova amostra. Dessa forma, nessas situações,

os tempos de *trip* seriam, para cada caso, o obtido na simulação somado com o atraso de comunicação do canal, Δt_{Canal} , e com o tempo de processamento do algoritmo, Δt_{CPU} .

O tempo de processamento é somado também ao tempo de *trip* da simulação e ao atraso do canal pois é o intervalo que o algoritmo leva para processar a lógica (figura 3.3) a partir da chegada da última amostra que o método recebe antes de ativar a saída de *trip* para os DJs. No entanto, sobretudo para linhas mais extensas, o tempo de processamento, que tem ordem de magnitude de microssegundos, tende a ser significativamente menor do que o atraso de comunicação, que costuma ser da ordem de alguns milissegundos.

Ainda assim, os resultados de velocidade de um algoritmo de proteção de linha por canal piloto são tipicamente analisados sem considerar os atrasos de propagação e os tempos de processamento, pois:

- o atraso de propagação existe independentemente do algoritmo de proteção piloto;
- o valor de Δt_{Canal} varia e depende de características tais como o comprimento da LT, a infraestrutura de rede e de telecomunicações nos terminais, a disposição física, o arranjo e tipo do canal de comunicações, entre outras; e
- o tempo de processamento depende de fatores tais como a lógica do algoritmo, a implementação, o número de operações de ponto flutuante, em inglês *floating point operations* (FLOPS), os tamanhos dos vetores, o *clock* e a arquitetura do processador do IED, entre outros.

Para a linha considerada, supondo que a comunicação entre os IEDs seja direta, isto é, sem quaisquer equipamentos intermediários, que também podem adicionar atrasos de alguns milissegundos, o atraso de comunicação (considerado constante) vale $\Delta t_{\text{Canal}} = 0,434$ [ms]. Isso ocorre pois, de acordo com (CIGRE, 2001), o tempo de propagação de valores amostrados por enlaces de fibra ótica (OPGW) é de aproximadamente 5 [$\mu\text{s}/\text{km}$].

Para a versão implementada do algoritmo proposto no IED utilizado nos testes, o tempo de processamento médio considerando a frequência de 64 amostras por ciclo e tamanho MC para os *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R (que foi o tamanho, dentre os testados, com o qual o algoritmo se mostrou desempenho aceitável, com detecção de faltas rápida e sem quaisquer falhas) vale $\Delta t_{\text{CPU}} = 0,074$ [ms], conforme analisado no próximo capítulo.

Assim, a título de exemplo, considere o algoritmo com *buffers* de tamanho MC sendo executado no IED do terminal L e a falta interna AN a $1/6$ do comprimento da linha, com início no instante $t = 0,02$ [s], condição de carga (1) e resistência de 0,1 [Ω].

Considere também que o sincronismo é ideal, ou seja, não há quaisquer desalinhamentos significativos entre os instantes de aquisição das n -ésimas amostras dos terminais, $t_{L,n}$ e $t_{R,n}$. Por conta do algoritmo de pingue-pongue (IEEE, 2015), esses instantes são virtualmente iguais nessa situação, conforme apresentado na equação (4.1), onde n é o índice correspondente à n -ésima aquisição de valores amostrados realizada em cada terminal.

$$t_{L,n} = t_{R,n} = t_n = T_a \cdot (n - 1) \quad (4.1)$$

Nesse contexto, a figura 4.11 ilustra um diagrama de tempo que considera os números de amostragem n , os instantes de amostragem, de chegadas de amostras do terminal remoto, de início da falta e de *trip*, o tempo de processamento (apenas após a última amostra que o algoritmo necessita para detectar a falta, de forma a diminuir a poluição visual da figura) e os valores amostrados na fase A da linha, em cada terminal.

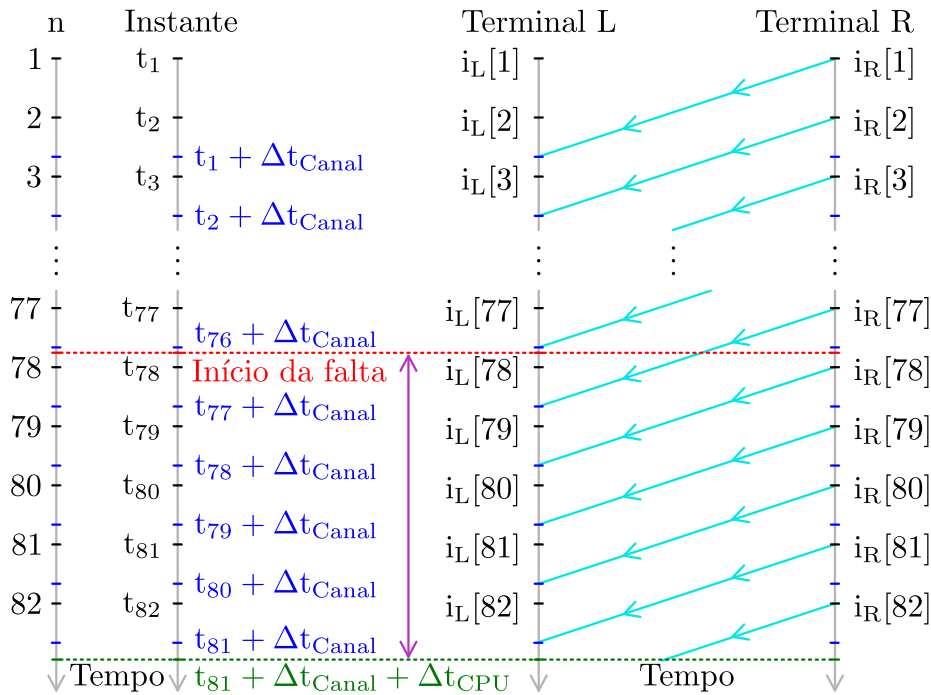


Figura 4.11: Diagrama ilustrando as amostragens, os instantes de aquisição, chegada das amostras, falta e *trip*, valores amostrados, atrasos de comunicação e tempo de processamento do algoritmo (MC) para caso exemplo

Na simulação desse caso, o algoritmo com vetores de MC detectou a falta na amostragem 81 ($t_{81} = 0,020833$ [s]), isto é, após a aquisição de quatro amostras de correntes da falta, que inicia entre as amostragens 77 ($t_{77} = 0,019792$ [s]) e 78 ($t_{78} = 0,020052$ [s]).

Assim, na condição de simulação sem considerar os atrasos, o tempo de *trip* foi de 0,833 [ms] (diferença entre o instante t_{81} , em que o algoritmo detecta a falta, e o instante de início da falta, igual a 0,02 [s]). Entretanto, o tempo de *trip* com os atrasos (representado

pelo intervalo destacado em roxo) é dado por $t_{81} + \Delta t_{\text{Canal}} + \Delta t_{\text{CPU}} - 0,02$ [s], que por sua vez resulta em 1,341 [ms].

Vale comentar que esse valor, de 1,341 [ms], embora maior do que o tempo de *trip* obtido na simulação, ainda é consideravelmente menor do que os tempos de *trip* de algoritmos de proteção de distância, que tipicamente são próximos a um período de frequência fundamental (aproximadamente 16,67 [ms] para a frequência de 60 [Hz]).

Dessa forma, essa análise mostrou como a velocidade dos algoritmos de proteção piloto é determinada quando são levados em conta os atrasos de comunicação e o tempo de processamento. Ainda assim, conforme mencionado anteriormente, os atrasos de comunicação e o tempo de processamento tipicamente não são considerados nos resultados de validação de métodos de proteção por canal piloto, uma vez que são variáveis relacionadas com fatores que independem do algoritmo utilizado.

Portanto, todos os resultados de tempos de *trip* do algoritmo apresentado nas próximas seções deste trabalho não consideram esses intervalos de tempo adicionais, a menos quando explicitado. Ainda assim, vale comentar que, caso seja de interesse verificar a influência dos atrasos de comunicação e de processamento em outros casos e métodos, pode-se reproduzir a análise realizada para a falta exemplo ilustrada na figura 4.11, isto é, somar os atrasos Δt_{Canal} e Δt_{CPU} ao tempo de *trip* obtido originalmente na simulação.

4.5 Influência da frequência de amostragem

Como mencionado na descrição dos casos de falta no sistema de 440 [kV], os sinais de correntes resultantes do ATP foram re-amostrados para a frequência de amostragem de 3,84 [kHz] (64 amostras por ciclo).

Esse valor foi escolhido pois é típico de muitos IEDs comerciais. Além disso, o IED utilizado para a implementação e testes experimentais do algoritmo apresentado nessa pesquisa (próximo capítulo) trabalha exclusivamente com essa frequência de amostragem.

Desse modo, a presente seção apresenta os resultados de tempos de *trip* do algoritmo proposto considerando frequências de amostragem diferentes. Foram consideradas as frequências de amostragem entre 0,96 [kHz] (16 amostras por ciclo) e 9,60 [kHz] (160 amostras), com passos de 0,24 [kHz] (+4 amostras por ciclo a cada passo).

O método foi testado, com todas as frequências de amostragem consideradas e com os tamanhos dos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de um quarto de ciclo (QC), meio ciclo (MC) e um ciclo

completo (CC) correspondentes, no caso da falta interna AN que se inicia em $t = 0,02$ [s], na condição de carga (1), possui resistência de $0,1$ [Ω] e encontra-se localizada a $1/6$ da linha protegida desde a SE Bom Jardim.

Nesse contexto, a figura 4.12 apresenta os tempos de *trip*, em [ms], obtidos pelo algoritmo para esse caso em função da frequência de amostragem utilizada.

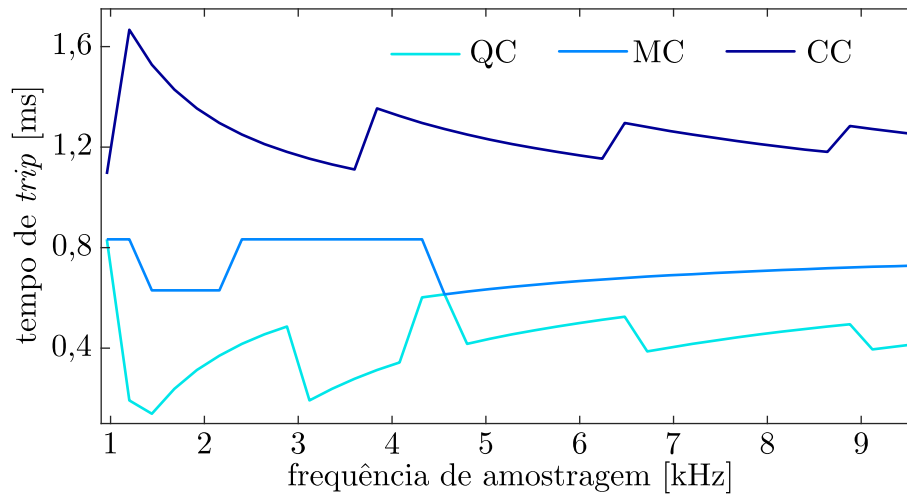


Figura 4.12: Tempos de *trip* do algoritmo em função da frequência de amostragem

É possível observar que, para esse caso de falta, o tamanho de MC é a configuração dos *buffers* para o qual o algoritmo apresenta a menor variação nos tempos de *trip* (valores entre $0,614$ e $0,833$ [ms]) em função da frequência de amostragem. Além disso, conforme discutido previamente, a utilização do algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de MC configura uma solução tanto rápida como robusta e efetiva para diferenciar faltas internas de externas corretamente, tanto nas faltas normais como nas faltas em condições críticas.

Dessa forma, o algoritmo com MC também foi testado, para todas as frequências de amostragem consideradas, nas condições críticas. Os resultados de robustez e segurança observados na frequência de amostragem nominal, de $3,84$ [kHz], foram verificados também para as demais taxas de amostragem testadas, na medida em que não foram verificadas nem falhas de segurança nas condições críticas nem falhas de operação em faltas internas de alta impedância.

O algoritmo com *buffers* de tamanho QC apresentou a maior variação nos tempos de *trip* em função da frequência de amostragem (valores entre $0,139$ e $0,833$ [ms]). O método utilizando os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanho CC, por fim, apresentou tempos de *trip* em função da f_a variando entre $1,093$ [ms] e $1,667$ [ms].

Vale comentar que, na frequência de amostragem nominal, os tempos de *trip* do algoritmo proposto nesse caso de falta interna, considerando os tamanhos de QC, MC e CC,

foram respectivamente 0,313 [ms], 0,833 [ms] e 1,354 [ms]. Entretanto, com frequências de amostragem distintas, os tempos de *trip* variam pois os instantes de aquisição de amostras são diferentes de acordo com cada taxa de amostragem.

Assim, é possível observar que, sobretudo com os *buffers* contendo as amostras das correntes dos terminais \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanho MC (que se mostrou o melhor tamanho dentre os avaliados), o método proposto continua apresentando detecção de faltas internas rápida e eficiente para diversas frequências de amostragem.

4.6 Influência da resistência de falta

Conforme discutido nas seções anteriores deste capítulo, o algoritmo se mostrou capaz de detectar com precisão faltas internas à LT protegida com resistências de até 1000 [Ω].

Ainda assim, para verificar a variação dos tempos de *trip* do algoritmo proposto em função da resistência de falta, o caso da falta interna AN localizada a $1/6$ da SE Bom Jardim, na condição de carga (1) e com início em $t = 0,02$ [s] foi considerado (na frequência de amostragem nominal). Foram consideradas resistências de falta com os valores de 0,01 [Ω], 0,1 [Ω], 1 [Ω] e com valores na faixa compreendida entre 5 e 1000 [Ω], com passos de 5 [Ω], resultando em 203 novos casos de simulação.

Nesse contexto, a figura 4.13 apresenta os tempos de *trip* do algoritmo para essa falta interna, em função da resistência de falta.

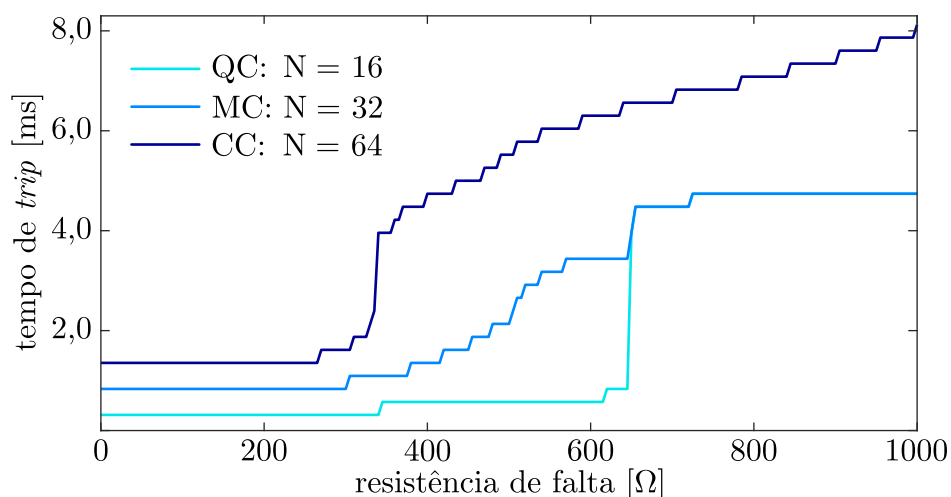


Figura 4.13: Tempos de *trip* do algoritmo em função da resistência de falta

É possível observar que os tempos de *trip* apresentados pelo algoritmo aumentam com a resistência da falta, para os três tamanhos considerados (QC, MC e CC). Para esta

falta específica, além disso, pode-se notar que para resistências maiores do que 650 [Ω], os tempos de *trip* do algoritmo para os tamanhos de QC e CC são iguais. Comenta-se que este resultado (tempos de *trip* iguais para altas resistências considerando os tamanhos de QC e MC) não necessariamente será verificado para outras faltas nesse sistema elétrico ou em redes com características diferentes.

Com a resistência de 1000 [Ω], para a falta considerada, os tempos de *trip* foram de 4,740 [ms] para \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de QC e MC e de 8,125 [ms] para os *buffers* com tamanho de CC.

Ainda assim, conforme analisado e discutido previamente, o algoritmo mostrou-se capaz de detectar corretamente faltas internas com diversas resistências.

4.7 Oscilação de potência

Tipicamente, em sistemas com múltiplas linhas e circuitos que integram geradores a grandes redes elétricas, eventos de oscilação de potência decorrentes de faltas e aberturas nas LTs podem ocorrer.

Casos envolvendo oscilação de potência podem ser críticos, sobretudo para algoritmos de proteção de distância baseados em fasores, uma vez que os valores estimados de impedância durante a oscilação são prejudicados (VIANNA, 2021). Dessa forma, soluções baseadas na função 21 podem apresentar falhas de segurança por causa da oscilação ou até mesmo falhas de operação quando ocorrem faltas trifásicas (simétricas) durante a oscilação (ANDANAPALLI; BISWAL, 2020).

Em complemento, vale a pena comentar que, para evitar falhas de segurança dos algoritmos de proteção de distância em meio a uma oscilação de potência, podem ser empregados algoritmos adicionais de detecção e bloqueio de *power swing* (função 68 da norma ANSI (IEEE, 2008)). Entretanto, com o relé bloqueado por conta de uma oscilação de potência, o algoritmo de proteção de distância empregado fica sujeito a apresentar falhas de operação caso ocorra uma falta interna em meio à mesma oscilação.

Algoritmos de proteção piloto e diferencial, por sua vez, geralmente não apresentam falhas em situações envolvendo faltas e oscilações de potência. Isso ocorre pois, quando não há faltas na condição de oscilação, as correntes continuam sendo semelhantes, de modo a dispensar lógicas de bloqueio. Entretanto, quando uma falta interna ocorre, as correntes dos terminais passam a ter sentidos opostos e valores diferentes, o que permite a detecção correta da falta interna.

Assim, para garantir que o algoritmo de proteção piloto proposto não apresenta quaisquer falhas em uma condição envolvendo faltas internas e oscilação de potência, foi considerado e simulado no ATP o sistema de MS contra barra infinita ilustrado na figura 4.14, detalhado na referência (HAGINOMORI et al., 2016).

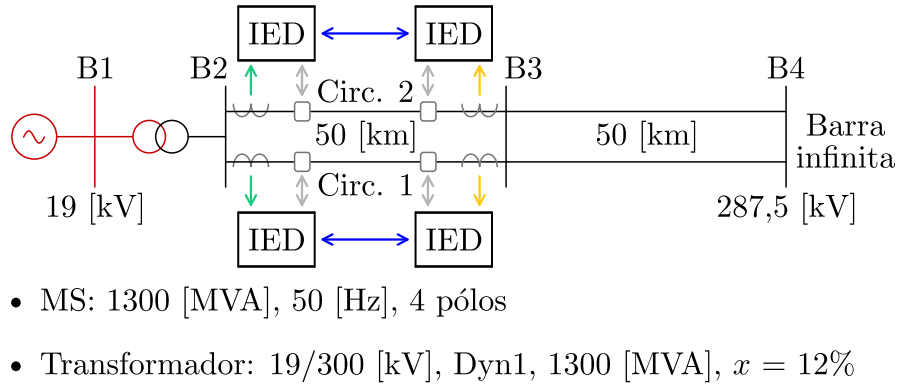


Figura 4.14: Sistema elétrico de MS contra barra infinita considerado para caso de faltas e oscilação de potência

Nesse sistema, a linha protegida, que conecta a barra B2 à barra B3, possui circuito duplo, tensão de 300 [kV] e 50 [km] de extensão. O algoritmo protege os dois circuitos dessa linha, conforme ilustrado na figura.

Os parâmetros de sequência positiva das linhas desse sistema, calculados na frequência de 50 [Hz], são $R_1 = 0,0747$ [Ω/km], $X_1 = 0,4207$ [Ω/km] e $B_1 = 2,7185$ [$\mu\text{S}/\text{km}$]. Os parâmetros de sequência zero dessas LTs, por sua vez, são $R_0 = 0,2102$ [Ω/km], $X_0 = 0,9426$ [Ω/km] e $B_0 = 1,7054$ [$\mu\text{S}/\text{km}$]. A indutância mútua de sequência zero entre os dois circuitos, finalmente, vale $M_0 = 0,4322$ [Ω/km]. As LTs foram modeladas considerando-se o modelo de parâmetros invariantes com a frequência.

A sequência de eventos do caso simulado é a seguinte:

- no instante $t = 0,453$ [s], uma falta trifásica é iniciada no circuito 2, a 40 [km] da barra B2, com resistência de 1 [Ω];
- no instante $t = 0,500$ [s], os DJs do circuito 2 realizam uma abertura tripolar nesse circuito, provocando a oscilação de potência;
- no instante $t = 4,000$ [s], uma falta com as mesmas características da anterior é iniciada no circuito 1 (em meio à oscilação de potência); e
- no instante $t = 4,200$ [s], a MS perde o sincronismo e a simulação termina.

Todos os sinais de corrente provenientes da simulação foram re-amostrados para a frequência de amostragem de 3,20 [kHz], que corresponde a 64 amostras por ciclo de 50 [Hz] (frequência dessa rede).

Os sinais de corrente foram transformados para a corrente secundária nominal de 5,0 [A], de forma que o parâmetro i_M foi ajustado para 1,5 [A], como no sistema de 440 [kV]. Nos dois circuitos da LT protegida, o algoritmo foi simulado considerando os tamanhos de um quarto de ciclo (QC: $N = 16$), meio ciclo (MC: $N = 32$) e um ciclo completo (CC: $N = 64$) para os *buffers* de amostras dos terminais \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

No circuito 2 (falta normal, sem qualquer oscilação de potência, iniciada no instante $t = 0,453$ [s]), os tempos de *trip* (para a fase C, em que o método identificou a falta mais rapidamente) apresentados pelo algoritmo foram, para os tamanhos de QC, MC e CC, 0,750 [ms], 1,688 [ms] e 2,625 [ms].

Após a abertura do circuito 2, a oscilação de potência é iniciada, na medida em que o ângulo do rotor da MS δ começa a variar (ZANETTA JR., 2006). A frequência da oscilação observada a partir das variações de δ é 0,45 [Hz]. Além disso, durante a oscilação, a frequência da rede elétrica apresenta variações consideráveis, atingindo os valores de 51,62 [Hz] (aumento de 3,24%) e 48,48 [Hz] (diminuição de 3,04% em relação à frequência nominal do sistema).

Ainda assim, durante todo o intervalo compreendido entre o início da oscilação de potência ($t = 0,500$ [s]) e o início da falta interna sob a oscilação ($t = 4,000$ [s]), o algoritmo proposto no circuito 1 não apresenta nenhuma falha de segurança.

Após o início da falta interna ao circuito 1, por outro lado, o algoritmo percebe a falta corretamente, mesmo em meio à oscilação de potência. Os tempos de *trip* para essa falta (da fase C) são iguais a 1,250 [ms] (QC), 3,125 [ms] (MC) e 4,375 [ms] (CC).

Esses valores indicam que a detecção da falta sob a condição de oscilação de potência foi 0,500 [ms] (QC), 1,437 [ms] (MC) e 1,750 [ms] (CC) mais lenta do que a detecção da falta sem oscilação. Além disso, pode-se observar que os valores de BWMC durante a falta em meio à oscilação são maiores em comparação com os valores do circuito 2. Porém, ainda assim, os valores de BWMC são negativos durante a falta em meio à oscilação, o que possibilita a detecção correta de tal falta interna pelo algoritmo.

Desse modo, no circuito 1, o método não apresentou atuação indevida durante apenas a oscilação e detectou a falta interna corretamente, com os três tamanhos dos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R considerados. No circuito 2, por sua vez, o algoritmo detectou a falta interna trifásica

corretamente. Portanto, os resultados obtidos na presente análise atestam que a solução proposta é eficiente mesmo em casos com oscilação de potência.

A figura 4.15 ilustra, dessa forma, o ângulo δ e os coeficientes de BWMC dos dois circuitos ao longo do tempo.

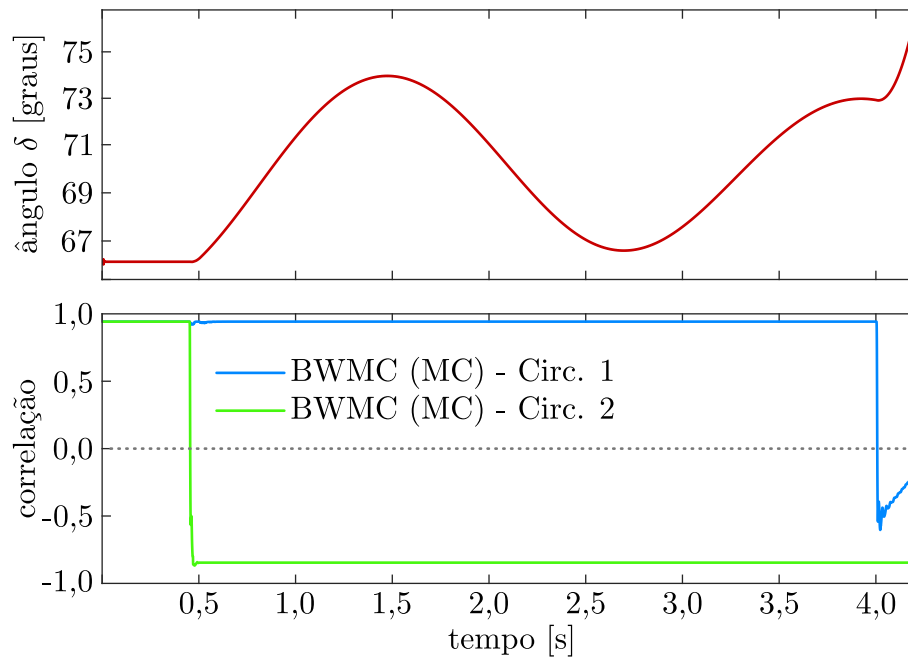


Figura 4.15: Ângulo do rotor da MS e coeficientes de BWMC (calculados com MC) dos dois circuitos (fase C) ao longo do tempo

4.8 Simulações adicionais em linhas diversas

Para complementar os testes realizados com o sistema de 440 [kV] e verificar que o algoritmo proposto pode ser aplicado para linhas diversas, foram considerados dois blocos adicionais de simulações de faltas internas realizadas no ATP, em LTs com características distintas pertencentes ao SIN.

Desse modo, a seguir, são apresentadas as linhas, as faltas e os resultados obtidos em cada um dos dois blocos de simulações, os quais comprovam que a solução proposta de fato pode ser facilmente aplicada e generalizada para linhas diferentes.

4.8.1 Bloco 1

A tabela 4.7 apresenta os níveis de tensão, o tipo (circuito simples ou duplo) e os comprimentos de cada uma das LTs do bloco 1.

Tabela 4.7: Características das linhas pertencentes ao bloco 1

Linha (L - R)	Tensão [kV]	Tipo	Comprimento [km]
Emborcação - Uberlândia	138	Duplo	74
Governador Valadares - Mesquita	230	Simple	80
Montes Claros - Várzea da Palma	345	Simple	145
Cachoeira Paulista - Tijuco Preto	500	Simple	181
Ivaiporã - Itaberá	765	Simple	265

A tabela 4.8, por sua vez, apresenta as potências de curto-circuito monofásico e trifásico dos equivalentes dos terminais de cada LT.

As informações relativas a carregamento, tipos dos condutores e geometria das torres de cada uma dessas linhas, por sua vez, encontram-se descritas em detalhe nas referências (SANTOS, 2004) e (VIANNA, 2021). As LTs foram modeladas considerando-se o modelo Bergeron do ATP e os TCs, nessas simulações, foram considerados como ideais (sem característica de saturação não-linear).

Tabela 4.8: Potências de curto-circuito, em [GVA], nos terminais das LTs do bloco 1

Linha (L - R)	$S_{1\phi}$ (L)	$S_{3\phi}$ (L)	$S_{1\phi}$ (R)	$S_{3\phi}$ (R)
Emborcação - Uberlândia	3,12 \angle 88,1°	3,90 \angle 86,1°	1,59 \angle 80,7°	1,99 \angle 84,7°
Governador Valadares - Mesquita	1,56 \angle 85,0°	1,96 \angle 81,1°	3,86 \angle 88,0°	4,82 \angle 86,0°
Montes Claros - Várzea da Palma	0,87 \angle 85,2°	1,09 \angle 83,2°	1,49 \angle 88,6°	1,87 \angle 84,6°
Cachoeira Paulista - Tijuco Preto	12,7 \angle 89,9°	15,8 \angle 87,0°	11,9 \angle 88,9°	14,8 \angle 87,9°
Ivaiporã - Itaberá	16,1 \angle 89,1°	20,1 \angle 87,1°	17,9 \angle 89,5°	22,3 \angle 87,5°

Em cada linha, foram simuladas 408 faltas internas, sendo 168 faltas AN, 72 faltas BC, 72 faltas BCN e 96 faltas ABC. Todas as faltas foram aplicadas em pontos localizados desde $1/6$ a $5/6$ [pu] dos respectivos comprimentos totais de cada LT, com passos de $1/6$.

Os instantes de início das faltas foram $t = 16,67$ [ms] e $20,80$ [ms]. Além disso, cada caso de falta foi considerado em condições de carga leve e pesada.

As resistências das faltas AN foram consideradas com os valores de $0,005$ [Ω], 1 [Ω], $2,5$ [Ω], 10 [Ω], 25 [Ω] e 100 [Ω]. As resistências das faltas BC e BCN foram consideradas com os valores de $0,005$ [Ω], $0,5$ [Ω] e 1 [Ω]. As resistências das faltas ABC, por fim, foram consideradas com os valores de $0,005$ [Ω], $0,5$ [Ω], 1 [Ω] e $2,5$ [Ω].

Os sinais das correntes dos terminais foram re-amostrados para a frequência de $1,92$ [kHz], que corresponde a 32 amostras por ciclo de 60 [Hz]. Além disso, as correntes secundárias foram ajustadas para $5,0$ [A], tal como na linha Bom Jardim - Água Azul.

O algoritmo foi testado em todos os casos de todas as linhas, com os *buffers* de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de tamanhos de um quarto de ciclo (QC: $N = 8$), meio ciclo (MC: $N = 16$) e um ciclo completo (CC: $N = 32$). Vale a pena destacar que, em todas as linhas do bloco 1, o método proposto foi implementado de forma a considerar, também, os coeficientes de BWMC calculados a partir das correntes de sequência zero dos terminais.

Todas as faltas, em todas as linhas, foram detectadas corretamente pelo método de proteção piloto proposto. Não foram verificadas, dessa forma, nem falhas de segurança (atuação indevida nas condições de pré-falta) nem falhas de operação (não-atuação nas condições de faltas internas).

A tabela 4.9 apresenta, nesse contexto, os tempos de *trip* médios e máximos obtidos pelo algoritmo para cada LT do bloco 1. Os tempos de *trip* máximos foram verificados nas faltas com resistências mais elevadas.

Tabela 4.9: Tempos de *trip*, em [ms], para as linhas do bloco 1 (1,92 [kHz])

Linha (L - R)	(QC: $N = 8$)		(MC: $N = 16$)		(CC: $N = 32$)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Emborcação - Uberlândia	0,881	6,804	1,273	9,408	2,088	13,05
Gov. Valadares - Mesquita	1,342	6,804	2,173	15,66	3,099	16,14
Montes Claros - V. da Palma	2,399	5,762	4,014	16,18	5,206	17,18
C. Paulista - Tijuco Preto	1,256	6,804	1,911	15,14	2,850	16,14
Ivaiporã - Itaberá	1,495	6,804	1,889	8,887	2,794	16,14

Pode-se observar que, assim como no sistema de 440 [kV], o algoritmo apresentou tempos de *trip* da ordem de alguns milissegundos para essas LTs adicionais.

4.8.2 Bloco 2

A tabela 4.10 mostra os níveis de tensão, o número de casos simulados e os comprimentos de cada LT do bloco 2. Todas as linhas deste bloco possuem circuito simples. Comenta-se que elas foram agrupadas em um outro bloco pois, diferentemente das do bloco 1, foram modeladas e simuladas no âmbito desta pesquisa.

As linhas de cada nível de tensão considerados neste bloco foram modeladas com as mesmas torres e condutores, segundo o modelo Bergeron. Nesse contexto, as tabelas 4.11 e 4.12 apresentam respectivamente os parâmetros (resistência, reatância e susceptância) distribuídos de sequência positiva e zero de cada patamar de tensão, calculados com a rotina *Line Constants* do ATP.

Tabela 4.10: Características das linhas pertencentes ao bloco 2

Linha (L - R)	Tensão [kV]	n° de casos	Comprimento [km]
Botucatu - Capão Bonito	230	1158	119
Figueira - Chavantes	230	360	105
Campinas - Poços de Caldas	345	1158	127
Barro Branco - Padre Fialho	345	360	104
Angra dos Reis - Cachoeira Paulista	500	1158	104
Itatiba - Ibiúna	500	360	87

Tabela 4.11: Parâmetros de sequência positiva das linhas do bloco 2

Tensão [kV]	R_1 [Ω /km]	X_1 [Ω /km]	B_1 [μ S/km]
230	0,0632	0,3780	4,3548
345	0,0371	0,3649	4,6968
500	0,0198	0,3273	5,0559

Tabela 4.12: Parâmetros de sequência zero das linhas do bloco 2

Tensão [kV]	R_0 [Ω /km]	X_0 [Ω /km]	B_0 [μ S/km]
230	0,2871	0,9350	2,8308
345	0,2317	1,0758	3,5167
500	0,2397	0,8479	3,3486

As potências de curto-circuito monofásico ($S_{1\phi}$) e trifásico ($S_{3\phi}$) dos equivalentes de Thévenin modelados nos terminais de cada uma dessas linhas, em complemento, são apresentadas pela tabela 4.13.

Tabela 4.13: Potências de curto-circuito, em [GVA], nos terminais das LTs do bloco 2

Linha (L - R)	$S_{1\phi}$ (L)	$S_{3\phi}$ (L)	$S_{1\phi}$ (R)	$S_{3\phi}$ (R)
Botucatu - Capão Bonito	3,11 \angle 80,7°	3,57 \angle 81,3°	1,12 \angle 81,4°	1,04 \angle 80,0°
Figueira - Chavantes	3,92 \angle 81,0°	4,59 \angle 82,1°	4,73 \angle 84,2°	4,26 \angle 83,9°
Campinas - Poços de Caldas	9,52 \angle 86,2°	9,56 \angle 86,5°	10,3 \angle 84,8°	12,3 \angle 85,3°
Barro Branco - Padre Fialho	4,83 \angle 79,9°	5,91 \angle 84,9°	1,64 \angle 84,8°	1,43 \angle 84,0°
Angra dos Reis - C. Paulista	12,5 \angle 88,7°	10,9 \angle 89,3°	19,1 \angle 83,2°	24,5 \angle 85,2°
Itatiba - Ibiúna	14,1 \angle 84,4°	16,0 \angle 85,8°	13,6 \angle 87,2°	13,7 \angle 86,4°

As tensões nos terminais das LTs, considerando um cenário de carga pesada na condição de verão, em valores por unidade em relação aos níveis de tensão nominais de cada linha, são finalmente apresentadas pela tabela 4.14.

Tabela 4.14: Tensão nos terminais de cada linha do bloco 2

Linha (L - R)	Tensão em L [pu]	Tensão em R [pu]
Botucatu - Capão Bonito	1,025∠-39°	1,042∠-45°
Figueira - Chavantes	0,995∠-28°	1,035∠-30°
Campinas - Poços de Caldas	1,025∠-32°	1,018∠-36°
Barro Branco - Padre Fialho	1,019∠-28°	1,022∠-32°
Angra dos Reis - Cachoeira Paulista	1,060∠-25°	1,071∠-26°
Itatiba - Ibiúna	1,057∠-28°	1,087∠-33°

Nas linhas que conectam as SEs Botucatu e Capão Bonito, Campinas e Poços de Caldas e Angra dos Reis e Cachoeira Paulista, foram simuladas 386 faltas AN, 193 faltas BC, 386 faltas BCN e 193 faltas ABC. Nas demais linhas, foram consideradas 120 faltas AN, 60 faltas BC, 120 faltas BCN e 60 faltas ABC.

No total, considerando-se as seis LTs, o bloco 2 de simulações possui 4554 casos de faltas internas. Os pontos de aplicações das faltas, bem como as resistências e os instantes de início foram sorteados para cada caso. Em cada linha:

- as localizações das faltas foram sorteadas com uma distribuição uniforme entre os valores de 0,03 e 0,97 [pu] do comprimento total da LT, a partir dos respectivos terminais locais (L);
- as resistências foram sorteadas entre 0,01 e 1000 [Ω], utilizando-se uma distribuição exponencial de média 150 [Ω], pois faltas com resistências mais elevadas são mais raras de ocorrer (para faltas BC e ABC, que não envolvem a terra, o valor máximo de resistência de falta tolerado foi de 30 [Ω]); e
- os instantes de início das faltas foram sorteados entre 0,014 e 0,034 [s] (casos com 0,100 [s] de duração total).

Além disso, em cada caso, os módulos das tensões dos terminais calculadas com o ANAREDE, apresentadas na tabela 4.14, foram multiplicados por fatores aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo entre 0,85 e 1,15, de forma a gerar várias condições de carga distintas nos períodos anteriores ao início das faltas internas.

Vale a pena comentar que foram geradas, dessa forma, algumas condições de operação com valores de tensão que não irão ocorrer em situações práticas. Ainda assim, tais condições foram mantidas nas simulações pois o objetivo dessas análises é avaliar o algoritmo nas mais distintas condições de carregamento.

Os sinais de corrente provenientes do ATP, simulados com passos de integração numérica de 8 [μs], foram re-amostrados para as frequências de 1,92 [kHz], correspondente a 32 amostras por ciclo, 3,84 [kHz], correspondente a 64 amostras por ciclo, e 4,80 [kHz], correspondente a 80 amostras por ciclo de 60 [Hz].

Para cada uma das três frequências de amostragem, o algoritmo foi testado com os respectivos tamanhos de janela de um quarto de ciclo (QC), meio ciclo (MC) e um ciclo completo (CC). Além disso, também foram considerados os coeficientes de BWMC calculados a partir das correntes de sequência zero dos terminais respectivos de cada linha. Para todas as linhas, os TCs foram considerados como ideais e com relação de transformação de 1200:5.

Nesse contexto, as tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam os tempos de *trip* médios e máximos pelo algoritmo para cada linha e tamanho N dos vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , para as três frequências de amostragem utilizadas nas simulações. Assim como no bloco 1, não foram verificadas falhas de proteção por parte do algoritmo proposto, que detectou todas as faltas corretamente. Além disso, os valores dos tempos de *trip* máximos foram obtidos em faltas com resistências de valores próximos a 1000 [Ω].

Tabela 4.15: Tempos de *trip*, em [ms], para as linhas do bloco 2 (1,92 [kHz])

Linha (L - R)	(QC: N = 8)		(MC: N = 16)		(CC: N = 32)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Botucatu - Capão Bonito	0,991	9,396	1,650	14,58	2,601	16,96
Figueira - Chavantes	0,925	7,996	1,638	14,33	2,790	16,33
Campinas - Poços de Caldas	1,352	8,854	1,820	20,31	2,554	17,19
Barro Branco - Padre Fialho	0,936	7,071	1,653	14,53	2,670	16,69
Angra dos Reis - C. Paulista	0,682	6,671	0,907	11,31	1,332	15,85
Itatiba - Ibiúna	1,058	8,196	2,139	13,97	3,540	16,41

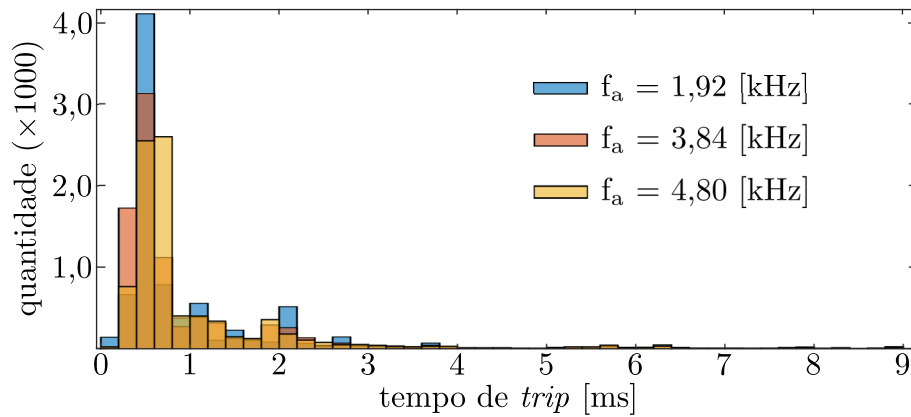
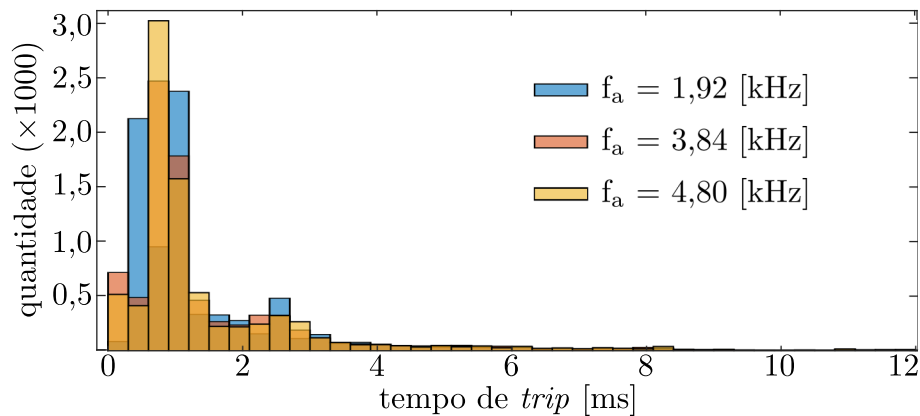
Tabela 4.16: Tempos de *trip*, em [ms], para as linhas do bloco 2 (3,84 [kHz])

Linha (L - R)	(QC: N = 16)		(MC: N = 32)		(CC: N = 64)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Botucatu - Capão Bonito	0,909	7,996	1,657	14,58	2,596	16,96
Figueira - Chavantes	0,869	7,996	1,701	14,33	2,845	16,81
Campinas - Poços de Caldas	1,520	15,39	2,014	20,31	2,684	17,01
Barro Branco - Padre Fialho	0,895	7,110	1,699	14,79	2,683	16,95
Angra dos Reis - C. Paulista	0,583	6,671	0,803	11,31	1,254	16,83
Itatiba - Ibiúna	1,068	14,18	2,153	13,97	3,542	16,67

Tabela 4.17: Tempos de *trip*, em [ms], para as linhas do bloco 2 (4,80 [kHz])

Linha (L - R)	(QC: N = 20)		(MC: N = 40)		(CC: N = 80)	
	Médio	Máximo	Médio	Máximo	Médio	Máximo
Botucatu - Capão Bonito	0,924	7,892	1,654	14,58	2,609	16,88
Figueira - Chavantes	0,909	8,100	1,722	14,43	2,835	16,23
Campinas - Poços de Caldas	1,611	9,817	2,089	20,21	2,684	22,08
Barro Branco - Padre Fialho	0,909	7,058	1,701	14,73	2,678	16,90
Angra dos Reis - C. Paulista	0,617	6,775	0,794	11,21	1,265	16,98
Itatiba - Ibiúna	1,070	8,092	2,156	13,87	3,545	16,62

As figuras 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam, em complemento, os histogramas dos tempos de *trip* obtidos em cada fase em todos os casos do bloco 2, considerando-se as três frequências de amostragem utilizadas nas análises (32, 64 e 80 amostras por ciclo de 60 [Hz]) e os tamanhos de QC, MC e CC.

**Figura 4.16:** Histograma dos tempos de *trip* de todas as fases em todos os casos (vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de um quarto de ciclo)**Figura 4.17:** Histograma dos tempos de *trip* de todas as fases em todos os casos (vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de meio ciclo)

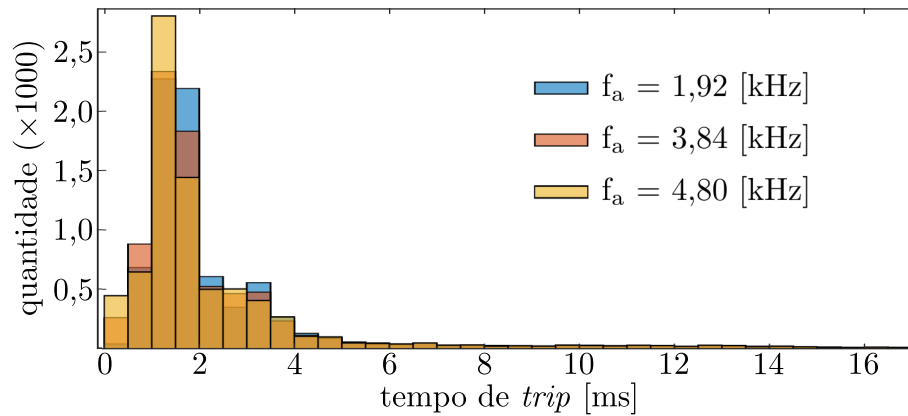


Figura 4.18: Histograma dos tempos de *trip* de todas as fases em todos os casos (vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de um ciclo completo)

A partir dos histogramas, verificou-se que, para as três taxas de amostragem consideradas neste bloco de simulações:

- mais de 73% dos tempos de *trip* obtidos pelo algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de QC (8 para 32 amostras por ciclo, 16 para 64 amostras por ciclo e 20 para 80 amostras por ciclo) são menores ou iguais a 1 [ms];
- mais de 77% dos tempos de *trip* obtidos pelo algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de MC (16 para 32 amostras por ciclo, 32 para 64 amostras por ciclo e 40 para 80 amostras por ciclo) são menores ou iguais a 2 [ms]; e
- mais de 80% dos tempos de *trip* obtidos pelo algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanhos de CC (32 para 32 amostras por ciclo, 64 para 64 amostras por ciclo e 80 para 80 amostras por ciclo) são menores ou iguais a 3 [ms].

Pode-se observar, a partir destes resultados, juntamente com os do bloco 1 (tabela 4.9), no sistema com oscilação de potência e no sistema de 440 [kV], que o algoritmo apresentado neste trabalho é rápido (tempos de *trip* médios de alguns milissegundos) e efetivo para detectar quaisquer faltas internas, em linhas diferentes e considerando três frequências de amostragem típicas de IEDs convencionais comerciais.

Por fim, são apresentadas, nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, as correntes dos terminais local e remoto e os coeficientes de BWMC (calculados com MC) de cada fase em casos de falta sorteados, sendo um caso para cada taxa de amostragem e nível de tensão.

Pode-se observar que o comportamento dos coeficientes de BWMC em cada fase permite separar as fases defeituosas das sãs com precisão, o que permite aberturas monophasares, caso estas sejam requisitadas e apropriadas para a LT protegida.

Para a frequência de amostragem de 32 amostras por ciclo de 60 [Hz], foi sorteada uma falta dupla-fase-terra BCN na linha de 500 [kV] Angra dos Reis (L) - Cachoeira Paulista (R). As características dessa falta são:

- localização a 58,10 [km] do terminal de Angra dos Reis (0,56 [pu]);
- resistência de 107,18 [Ω];
- início no instante 0,0274 [s]; e
- módulos das tensões nominais de Angra dos Reis e Cachoeira Paulista (tabela 4.14) multiplicados respectivamente por 0,98 e 1,06.

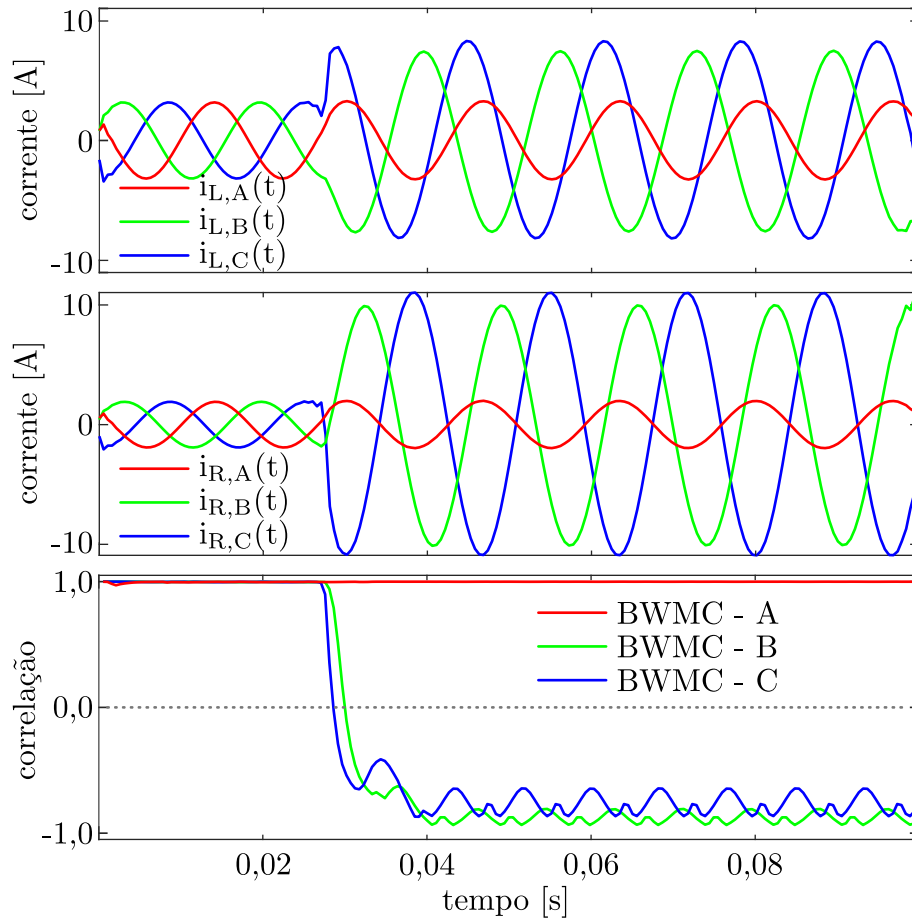


Figura 4.19: Correntes locais, remotas e coeficientes de BWMC (meio ciclo: $N = 16$) nas três fases para a falta BCN considerada (1,92 [kHz])

Para esse caso, aplicando o algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de tamanho MC, conforme apresentado na figura 4.19, os tempos de *trip* das fases B e C são respectivamente iguais a 2,808 e 1,246 [ms].

Vale comentar que, se a falta fosse bifásica BC, os coeficientes de BWMC apresentariam o mesmo comportamento (apenas os das fases B e C assumiriam valores negativos).

Para a frequência de amostragem de 64 amostras por ciclo de 60 [Hz], foi sorteada uma falta fase-terra AN na linha de 230 [kV] Figueira (L) - Chavantes (R). As características dessa falta são:

- localização a 73,53 [km] do terminal de Figueira (0,70 [pu]);
- resistência de 22,14 [Ω];
- início no instante 0,0216 [s]; e
- módulos das tensões nominais de Figueira e Chavantes (tabela 4.14) multiplicados respectivamente por 0,96 e 1,05.

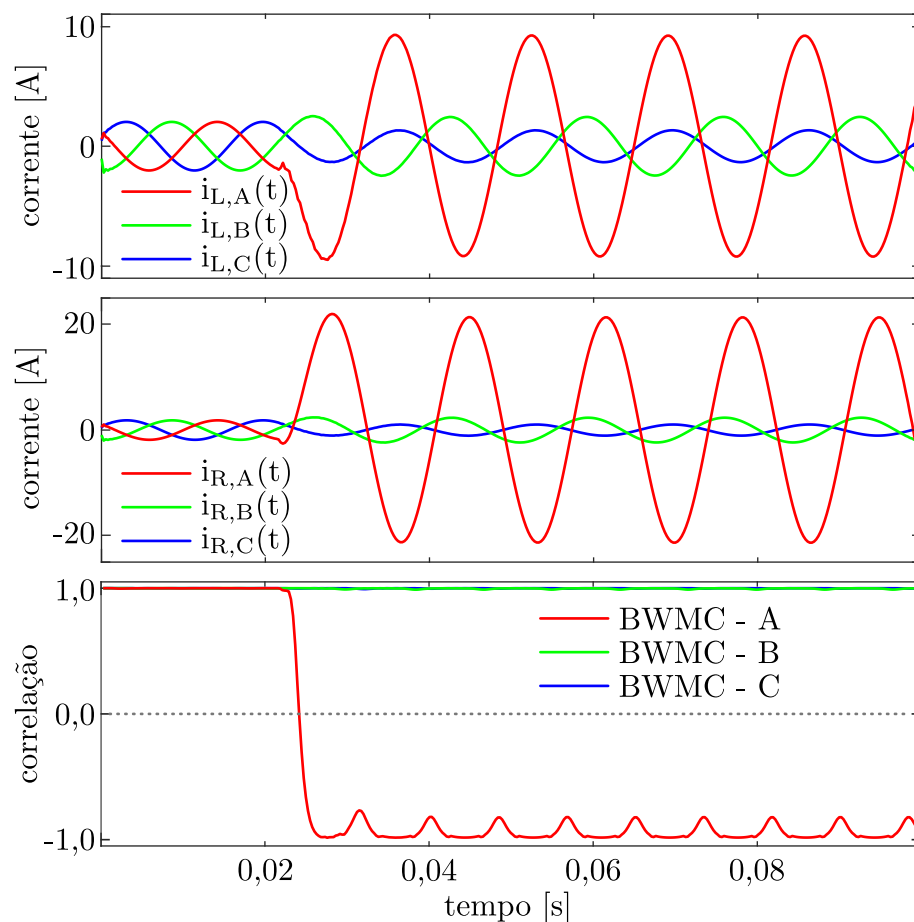


Figura 4.20: Correntes locais, remotas e coeficientes de BWMC (meio ciclo: $N = 32$) nas três fases para a falta AN considerada (3,84 [kHz])

Para esse caso, aplicando o algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de tamanho MC, conforme apresentado na figura 4.20, o tempo de *trip* da fase A é de 2,619 [ms].

Para a frequência de amostragem de 80 amostras por ciclo de 60 [Hz], por fim, foi sorteada uma falta trifásica ABC na linha de 345 [kV] Campinas (L) - Poços de Caldas (R). As características dessa falta são:

- localização a 10,90 [km] do terminal de Campinas (0,09 [pu]);
- resistência de 3,39 [Ω];
- início no instante 0,0244 [s]; e
- módulos das tensões nominais de Campinas e Poços de Caldas (tabela 4.14) multiplicados respectivamente por 1,01 e 0,96.

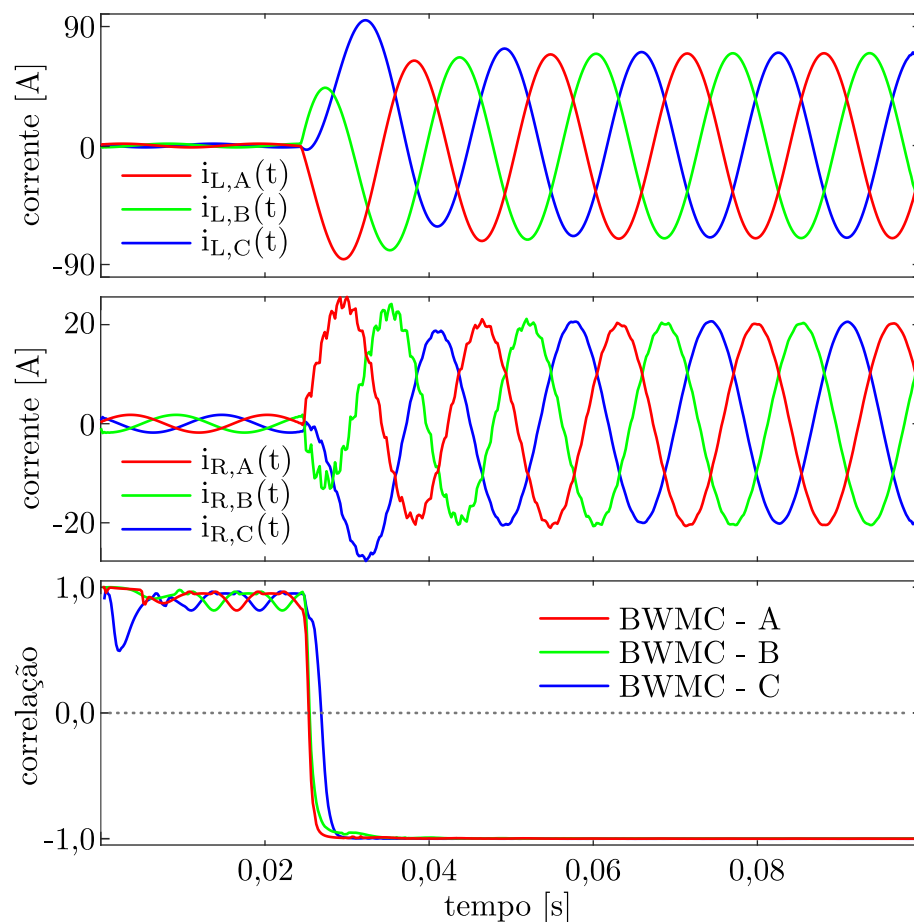


Figura 4.21: Correntes locais, remotas e coeficientes de BWMC (meio ciclo: $N = 40$) nas três fases para a falta ABC considerada (4,80 [kHz])

Para esse caso, aplicando o algoritmo com os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de tamanho MC, conforme apresentado na figura 4.21, os tempos de *trip* das fases A, B e C são respectivamente iguais a 1,017, 1,225 e 2,475 [ms].

4.9 Faltas simultâneas

A título de análise de sensibilidade, o algoritmo proposto BWMC também foi simulado em uma condição crítica envolvendo faltas simultâneas, no sistema de 440 [kV].

Situações envolvendo faltas simultâneas são consideravelmente raras e improváveis de ocorrer em sistemas de transmissão, sobretudo em LTs dos níveis de tensão de RB. Ainda assim, essa análise pode ser interessante para verificar o desempenho do algoritmo em tal cenário desafiador, mesmo que tenha caráter mais investigativo do que prático.

Nesse contexto, foram simuladas faltas fase-terra AN com resistência de 10 [Ω] nas linhas Água Azul - Santo Ângelo, Bom Jardim - Taubaté e Bom Jardim - Água Azul, na condição de carga (6). As faltas externas foram aplicadas nos pontos mencionados anteriormente, enquanto a falta interna foi aplicada a 72,25 [km] ($5/6$) da SE Bom Jardim.

A sequência das faltas nessa simulação, que tem 0,40 [s] de duração total, é a seguinte: no instante $t = 0,10$ [s], a falta externa na linha Água Azul - Santo Ângelo é iniciada; no instante $t = 0,20$ [s], a falta externa na linha Bom Jardim - Taubaté é iniciada; e no instante $t = 0,30$ [s], a falta interna na linha Bom Jardim - Água Azul é iniciada.

Todas as três faltas foram mantidas desde seu respectivo instante de início até o final da simulação, de modo a configurar a condição de faltas simultâneas. O algoritmo BWMC proposto foi simulado nesse caso com os vetores/*buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R de tamanho MC.

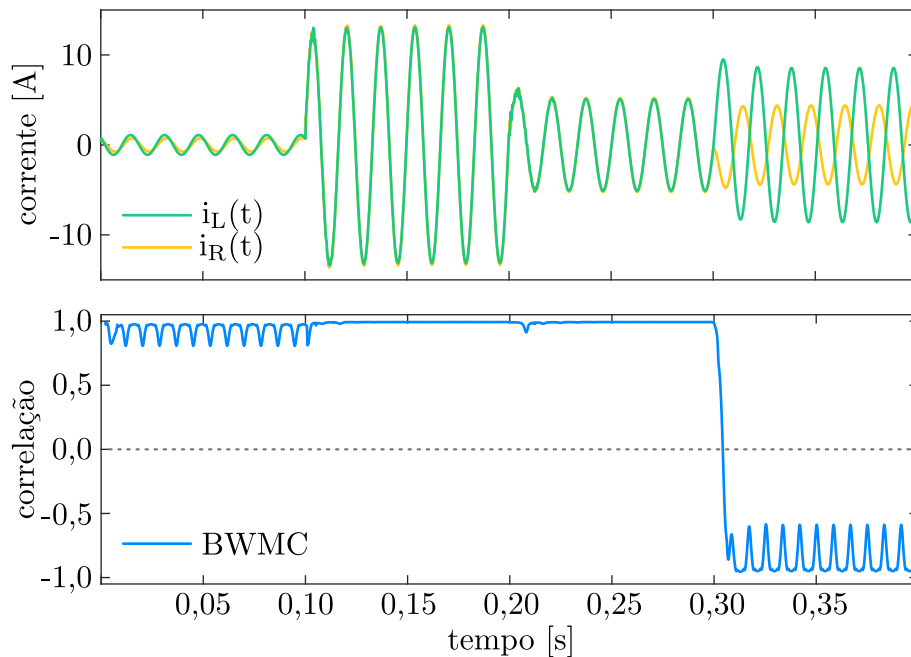


Figura 4.22: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para o caso de faltas simultâneas no sistema de 440 [kV]

A figura 4.22 apresenta, dessa forma, as correntes dos terminais da LT protegida, Bom Jardim - Água Azul, e os coeficientes de BWMC calculados com MC para esse caso. O algoritmo detectou a falta interna corretamente, com tempo de *trip* de 5,208 [ms], e não apresentou falhas de segurança durante as faltas externas simultâneas.

Pode-se observar que, durante as faltas externas simultâneas, os coeficientes de BWMC são praticamente constantes, diferentemente da condição de pré-falta, em que os valores de BWMC apresentam oscilações. Isso ocorre pois, na pré-falta, a corrente capacitiva é significativa em comparação com a corrente de carga, e logo impõe uma defasagem entre as correntes dos terminais, e durante as faltas externas de baixa impedância, as correntes de falta são consideravelmente superiores à corrente capacitiva da linha, o que faz com que as correntes dos dois terminais fiquem praticamente em fase.

4.10 Faltas em sistema com baixa potência de curto-circuito (*weak infeed*)

O algoritmo BWMC proposto foi testado também com sinais de faltas internas e externas simuladas em uma linha cuja potência de curto-circuito do equivalente no terminal local é baixa, configurando a condição conhecida geralmente como *weak infeed*.

Essa condição costuma ser crítica, sobretudo, para métodos de proteção de distância e de sobrecorrente, na medida em que as contribuições do terminal fraco para a falta são pequenas, isto é, as correntes de falta provenientes do terminal com *weak infeed* são similares em amplitude às correntes de carregamento normal.

Nesse contexto, a figura 4.23 apresenta o sistema de 500 [kV] e 60 [Hz] modelado no ATP e considerado para a realização das análises apresentadas nesta seção. Esse sistema encontra-se localizado no Estado do Rio de Janeiro, e a linha protegida é a que conecta a SE Zona Oeste à SE Angra dos Reis, cujo comprimento é de 97,60 [km]. Essa mesma rede é a que foi utilizada para a validação e para os testes do algoritmo de proteção diferencial baseado em inferência Bayesiana, apresentado em (TIFERES; MANASSERO JR., 2022).

A figura 4.23 apresenta também as potências de curto-circuito monofásico e trifásico dos terminais local (Zona Oeste) e remoto (Angra dos Reis) da LT protegida, em [GVA]. Pode-se observar que as potências de curto do terminal L são consideravelmente menores do que as do terminal R. A potência de curto fase-terra do terminal L é virtualmente nula, pois há um transformador com secundário em delta conectado a essa barra. Assim, o terminal de Zona Oeste é um terminal com *weak infeed*.

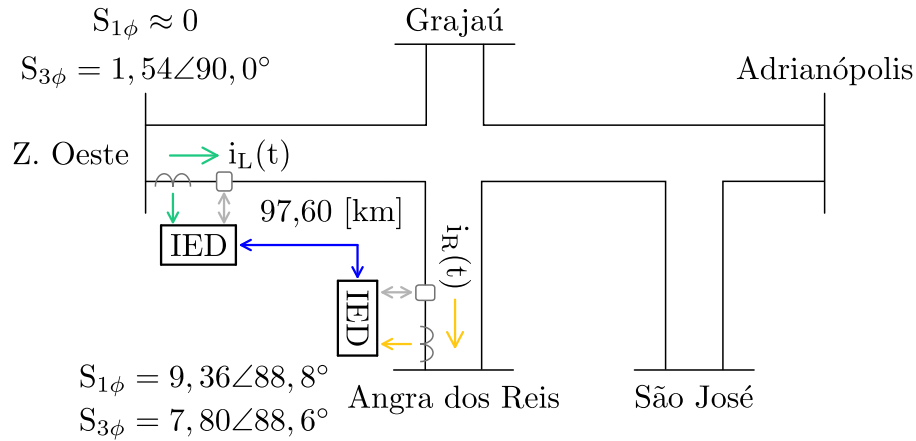


Figura 4.23: Sistema de 500 [kV] com terminal local (Zona Oeste) de baixa potência de curto-circuito (*weak infeed*)

As potências de curto-circuito monofásico ($S_{1\phi}$) e trifásico ($S_{3\phi}$) das demais barras desse sistema são $S_{1\phi} = 4,20 \angle 87,1^\circ$ e $S_{3\phi} = 3,36 \angle 86,6^\circ$ [GVA] para Grajaú, $S_{1\phi} = 7,29 \angle 85,7^\circ$ e $S_{3\phi} = 8,39 \angle 87,1^\circ$ [GVA] para Adrianópolis e $S_{1\phi} = 3,59 \angle 86,0^\circ$ e $S_{3\phi} = 3,80 \angle 87,3^\circ$ [GVA] para São José.

As linhas desse sistema foram modeladas no ATP considerando-se o modelo de parâmetros variantes com a frequência (MARTÍ, 1982). Na frequência fundamental de 60 [Hz], os parâmetros de sequência positiva das linhas são $R_1 = 0,0172$ [Ω/km], $X_1 = 0,3222$ [Ω/km] e $B_1 = 5,1258$ [$\mu\text{S}/\text{km}$], enquanto os de sequência zero são $R_0 = 0,3021$ [Ω/km], $X_0 = 1,0078$ [Ω/km] e $B_0 = 3,1446$ [$\mu\text{S}/\text{km}$]. As indutâncias mútuas de sequência zero entre circuitos paralelos valem, por sua vez, $M_0 = 0,4507$ [Ω/km]. Comenta-se, também, que foram considerados TCs com as mesmas características dos modelados e utilizados no sistema de 440 [kV].

Neste sistema elétrico de 500 [kV], foram simuladas 936 faltas. Dessas, 792 são internas à LT protegida Zona Oeste - Angra dos Reis e 144 são externas. Das 936 faltas consideradas, 390 são faltas fase-terra AN, 390 são faltas dupla-fase-terra BCN, 78 são faltas dupla-fase BC e 78 são faltas trifásicas ABC. As faltas internas na linha protegida foram simuladas desde 10,20 até 91,50 [km] a partir da SE Zona Oeste, enquanto as faltas externas foram aplicadas na barra de Angra dos Reis e a 6,10 [km] dessa SE, na linha para a SE São José.

As resistências das faltas envolvendo a terra (AN e BCN) variam desde 0,01 até 500 [Ω], enquanto as resistências das faltas entre fases (BC e ABC) variam desde 0,01 até 5 [Ω]. Os instantes de aplicação das faltas são 0,025 e 0,033 [s], sendo que a duração de cada caso de simulação é de 0,167 [s]. Os sinais do ATP foram reamostrados para 3,84 [kHz].

O algoritmo BWMC proposto foi simulado em todas as 936 faltas, considerando-se o tamanho de MC ($N = 32$ amostras) para os vetores/*buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R e o valor recomendado de 1,50 [A] para a corrente diferencial mínima de *pick-up* do método, i_M .

Em todos os casos, o algoritmo BWMC proposto apresentou desempenho satisfatório, na medida em que não foram verificadas falhas de segurança para as 144 faltas externas e nem falhas de operação para as 792 faltas internas com *weak infeed* no terminal local da LT protegida (SE São José).

O tempo de *trip* médio, mínimo e máximo, bem como o desvio-padrão de todos os tempos de *trip* do algoritmo proposto para essas faltas, foram respectivamente $\mu = 1,608$ [ms], mínimo = 0,781 [ms], máximo = 2,605 [ms] e $\sigma = 0,457$ [ms]. Pode-se observar, comparando tais resultados com os tempos de *trip* obtidos nas outras LTs, que eles possuem a mesma ordem de grandeza, de alguns milissegundos.

Portanto, o algoritmo proposto não é influenciado adversamente pela condição de *weak infeed*, diferentemente dos métodos de proteção de distância e sobrecorrente, que podem apresentar falhas de operação nessa condição crítica.

Nesse contexto, a figura 4.24 apresenta as correntes da fase A dos terminais da LT protegida e os respectivos coeficientes de para uma falta interna fase-terra AN, localizada a 91,50 [km] do terminal Zona Oeste, possui resistência de falta de 100 [Ω] e se inicia em 0,025 [s]. Para essa falta, o tempo de *trip* do algoritmo na fase A foi de 1,302 [ms].

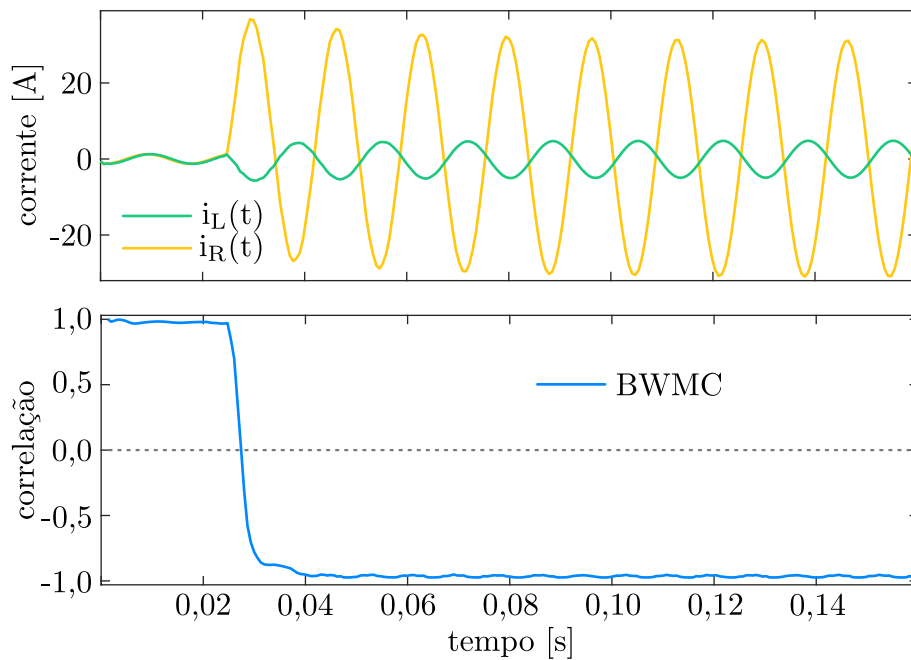


Figura 4.24: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta interna no sistema de 500 [kV] com *weak infeed*

Pode-se observar, nessa figura, que a corrente no terminal R é substancialmente maior do que a do terminal L, o que configura a condição de falta interna com *weak infeed*. Entretanto, ainda assim, como as correntes passam a ter sentidos opostos durante a falta, o algoritmo BWMC é capaz de detectar a falta com precisão e rapidez.

Conforme mencionado anteriormente, o sistema de 500 [kV] em que a linha protegida é a que conecta a SE Zona Oeste à SE Angra dos Reis é o mesmo utilizado para testar e validar o algoritmo baseado em inferência Bayesiana (TIFERES; MANASSERO JR., 2022). Assim, é possível comparar o algoritmo BWMC com o método baseado no Teorema de Bayes proposto em tal referência.

Do ponto de vista de robustez contra falhas de operação e de segurança, ambas as soluções apresentam o comportamento esperado, isto é, não cometem quaisquer falhas. Entretanto, os tempos de *trip* do algoritmo Bayesiano com o melhor conjunto de valores para os parâmetros de ajuste, que são $p_1 = 0,75$, $p_2 = 0,05$, $\beta = 4$ e $\mathfrak{p} = 0,10$, conforme descrito no Capítulo 2, para as mesmas 936 faltas, foram $\mu = 6,298$ [ms], mínimo = 4,700 [ms], máximo = 11,50 [ms] e $\sigma = 1,754$ [ms], que são consideravelmente maiores do que os do algoritmo BWMC.

Pode-se observar que o tempo de *trip* médio do algoritmo Bayesiano é aproximadamente 3,9 vezes maior do que o tempo de *trip* médio do algoritmo BWMC. Além disso, nota-se que o maior tempo de *trip* do algoritmo proposto considerando-se as faltas no sistema de 500 [kV] (2,605 [ms]) é inferior ao menor tempo de *trip* do algoritmo Bayesiano nessas mesmas faltas (4,700 [ms]). Assim, pode-se concluir que o algoritmo proposto é significativamente mais rápido do que o apresentado em (TIFERES; MANASSERO JR., 2022). Isso acontece pois o método proposto, diferentemente do algoritmo Bayesiano, não necessita de critérios de estabilidade adicionais à lógica principal de *trip* para não apresentar falhas de segurança na condição desafiadora de falta externa com saturação de TC, uma vez que a BWMC por si só já é suficientemente robusta.

4.11 Falta interna com *outfeed*

Uma outra condição desafiadora que pode ocorrer, sobretudo em linhas com altas potências de curto-circuito nos terminais durante operação com carregamentos elevados, são as faltas internas com *outfeed* (ALMEIDA, 2016).

Faltas internas com *outfeed* são raras de serem verificadas na prática pois são, tipicamente, faltas fase-terra de alta impedância que ocorrem em LTs de ultra-alta tensão com

potências de curto-circuito fase-terra elevadas e em situações de carga pesada, com considerável diferença angular entre as tensões dos terminais. Essas faltas são especialmente desafiadoras para os algoritmos de proteção piloto como o proposto pois em tais faltas, diferentemente de todos os demais casos analisados, as correntes dos terminais na fase defeituosa não ficam com sentidos opostos durante o curto-circuito.

Nesse contexto, na linha de 765 [kV] Ivaiporã - Itaberá, do bloco 1 de simulações, com 265 [km] de extensão e potências de curto-circuito dos terminais apresentadas na tabela 4.8, foram geradas e verificadas algumas faltas fase-terra AN internas na condição desafiadora de *outfeed*, com a finalidade de se analisar o desempenho do método proposto nessa condição crítica de falta interna.

A figura 4.25 apresenta, dessa forma, as correntes nos terminais da fase A e os respectivos coeficientes de BWMC calculados com MC (igual a 16 amostras para 1,92 [kHz]) em um caso de falta AN interna com resistência de 100 [Ω] localizada a 44,17 [km] da SE Ivaiporã, que inicia em meio a uma condição de carga pesada. Pode-se observar que, nesse caso, as correntes dos terminais têm o mesmo sentido durante toda a simulação.

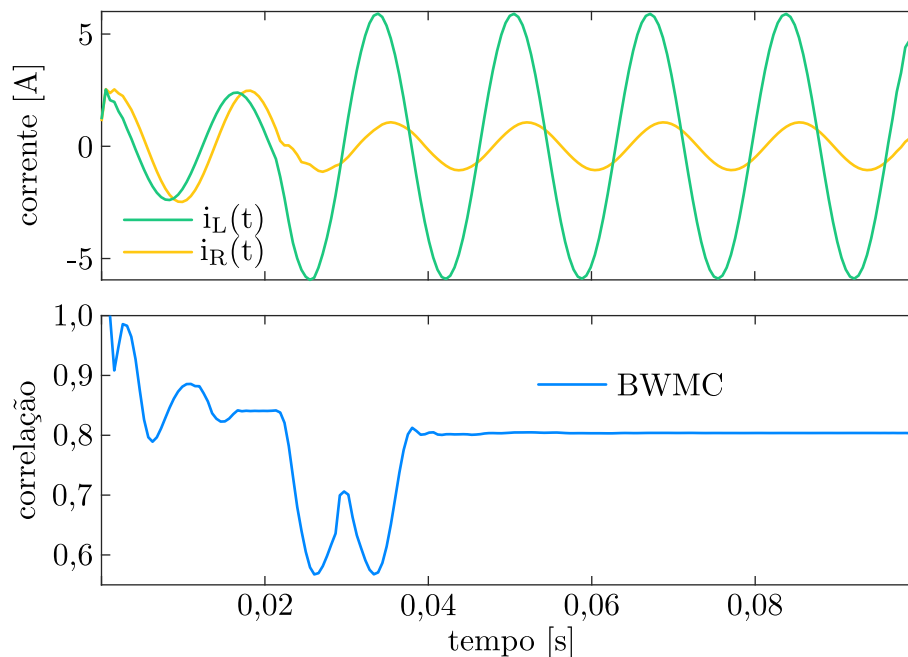


Figura 4.25: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 16$) para falta interna na linha de 765 [kV] com *outfeed*

Em complemento, pode-se notar que, em nenhum momento deste caso, os coeficientes de BWMC tornam-se negativos. Este resultado é coerente na medida em que as correntes das fases não ficam com sinais opostos. Vale comentar, além disso, que as demais técnicas de correlação e similaridade, bem como a própria solução diferencial convencional, também não são capazes de detectar essa falta utilizando apenas as correntes de fase.

Assim, para a detecção correta dessa falta interna, devem ser utilizados os coeficientes de BWMC calculados a partir das correntes de sequência zero dos terminais, que por sua vez podem ser calculadas através da média aritmética das amostras de corrente das fases.

Complementando as discussões dos capítulos anteriores, vale dizer que a utilização das correntes de sequência zero e de seus coeficientes de BWMC não necessariamente precisa ser empregada em toda e qualquer linha, tendo em vista que a escolha de se utilizar tais correntes e valores de BWMC aumenta significativamente a carga de processamento e que as condições de *outfeed* só são possíveis de serem verificadas em LTs e situações específicas. Ainda assim, para a linha de 765 [kV] Ivaiporã - Itaberá, que foi a única dentre todas as consideradas nesta pesquisa em que foram verificados casos com *outfeed*, o uso das correntes de sequência zero e de seus respectivos valores de BWMC pode ser bastante vantajoso.

A figura 4.26 apresenta, nesse contexto, as correntes de sequência zero dos terminais e seus respectivos coeficientes de BWMC calculados com MC para a mesma falta fase-terra interna com *outfeed*. Pode-se observar que, diferentemente das correntes da fase A, as correntes de sequência zero ficam com sentidos opostos durante a falta, o que permite com que os coeficientes de BWMC tornem-se negativos e a falta seja corretamente detectada. Nesse caso, o tempo de *trip* do algoritmo para as correntes de sequência zero foi de 3,679 [ms], sendo que no instante de *trip*, o valor da maior corrente diferencial de sequência zero i_D foi de 1,558 [A].

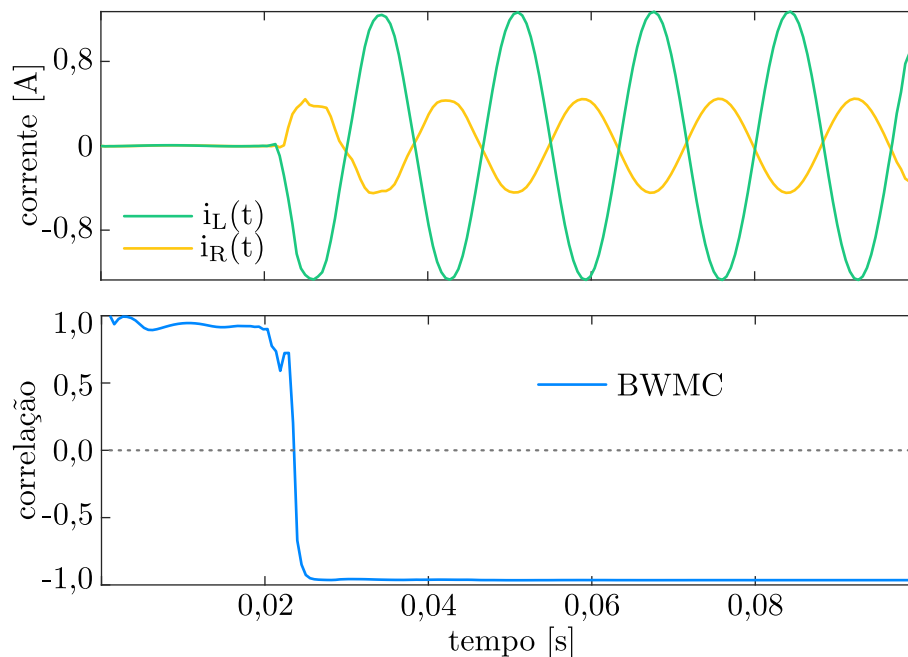


Figura 4.26: Correntes de sequência zero nos terminais e coeficientes de BWMC (MC: $N = 16$) para falta interna na linha de 765 [kV] com *outfeed*

Dessa forma, pode-se notar que a utilização das correntes de sequência zero é uma alternativa eficaz para a detecção de faltas internas na condição de *outfeed*, tanto para o algoritmo BWMC proposto como para as demais alternativas discutidas. Comenta-se, também, que a utilização das correntes de sequência zero aumenta a sensibilidade para a detecção de faltas com resistências muito elevadas, como por exemplo as de 1000 [Ω] analisadas anteriormente.

Entretanto, vale a pena comentar que a utilização das correntes de fase, em relação ao uso das correntes de sequência zero, é vantajosa por permitir identificar com precisão qual(is) a(s) fase(s) defeituosa(s) e por viabilizar, caso considerado necessário, a utilização da abertura e do religamento monopolar. Além disso, um correto diagnóstico de quais fases estão danificadas pode agilizar na identificação do motivo de ocorrência da perturbação.

Conforme apresentado em todas as análises anteriores, o algoritmo BWMC proposto nesta pesquisa é eficiente para detectar, usando as correntes de fase, faltas dos mais diversos tipos e com diferentes características, em várias linhas. Dessa forma, vale estudar se, em uma dada LT, a utilização do algoritmo com as correntes de sequência zero deve ou não ser empregada. Caso seja uma LT como a que conecta a SE Ivaiporã à SE Itaberá, de tensão 765 [kV] e com elevadas potências de curto-circuito nos terminais, a utilização dos coeficientes de BWMC de sequência zero é recomendada para se aumentar a confiabilidade do algoritmo em casos como o apresentado, mesmo com o conseqüente acréscimo de carga computacional do método e com a possibilidade da não identificação da fase defeituosa no caso de uma falta monofásica com *outfeed*.

4.12 Influência da componente unidirecional

Tipicamente, faltas em LTs apresentam comportamento semelhante aos de circuitos RL série com excitação senoidal (ZANETTA JR., 2020). Por isso, a depender do instante de início de uma falta e do valor da tensão nesse instante, pode existir uma componente unidirecional amortecida nas correntes de falta.

Conforme mencionado anteriormente, e em referências como (IBARRA et al., 2022), a componente unidirecional pode causar erros na estimação dos fasores calculados pela TDF, de forma que se fazem necessárias técnicas adicionais para minimizar o efeito da componente aperiódica. Em algoritmos que não são baseados em quantidades fasoriais, por outro lado, a componente unidirecional presente nos sinais de corrente de falta geralmente não impacta significativamente o desempenho da solução de proteção.

Tendo em vista a quantidade de faltas com as quais o algoritmo BWMC proposto foi testado neste trabalho, que foram aplicadas em LTs com características diferentes e em instantes e condições diversas, pode-se inferir que a componente unidirecional não apresenta influência relevante sobre o método apresentado.

Ainda assim, para de fato confirmar essa hipótese, foram gerados e simulados casos de faltas internas e externas no sistema de 440 [kV] em que as componentes unidirecionais presentes nos sinais de corrente de falta verificadas são máximas e mínimas.

Nesse contexto, foram simuladas faltas fase-terra AN com resistência de 10 [Ω] no meio da linha protegida, Bom Jardim - Água Azul, e na linha externa Água Azul - Santo Ângelo, na condição de carga (6).

As faltas em que foram verificadas as componentes unidirecionais máximas nas correntes da fase A dos terminais da LT protegida foram iniciadas no instante $t = 0,03014$ [s], enquanto as faltas que resultaram nas componentes unidirecionais mínimas foram iniciadas no instante $t = 0,03431$ [s].

Nas quatro faltas simuladas, o algoritmo BWMC proposto foi simulado considerando-se os tamanhos de QC ($N = 16$ amostras), MC ($N = 32$ amostras) e CC ($N = 64$ amostras) para os vetores de amostras de corrente \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

Os resultados dessas simulações atestam que o método de proteção de linha por canal piloto proposto nesta pesquisa de fato não é significativamente influenciado pela componente unidirecional presente nas correntes de falta durante o transitório.

4.12.1 Faltas internas

As figuras 4.27 e 4.28, nesse sentido, apresentam respectivamente as correntes da fase A dos terminais e os respectivos coeficientes de BWMC calculados com MC para as faltas internas com as componentes unidirecionais amortecidas mínima e máxima.

Para a falta com a componente unidirecional mínima, os tempos de *trip* do algoritmo foram 0,474 [ms] (QC), 0,735 [ms] (MC) e 1,255 [ms] (CC). Para a falta com a componente unidirecional máxima, por outro lado, os tempos de *trip* foram 1,370 [ms] (QC), 1,631 [ms] (MC) e 2,152 [ms] (CC). Esse resultado indica que a presença da componente unidirecional atrasa em aproximadamente 0,9 [ms] a velocidade do algoritmo, para os três tamanhos considerados para os *buffers* de amostras. Entretanto, ainda assim, pode-se notar que o método proposto detecta as duas faltas internas com rapidez de milissegundos.

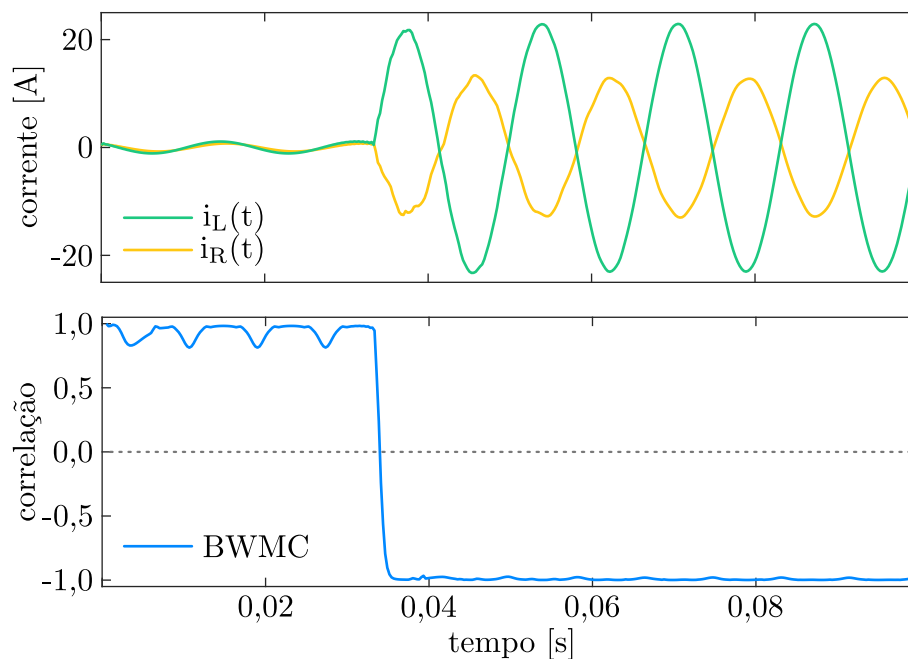


Figura 4.27: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta interna no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional mínima

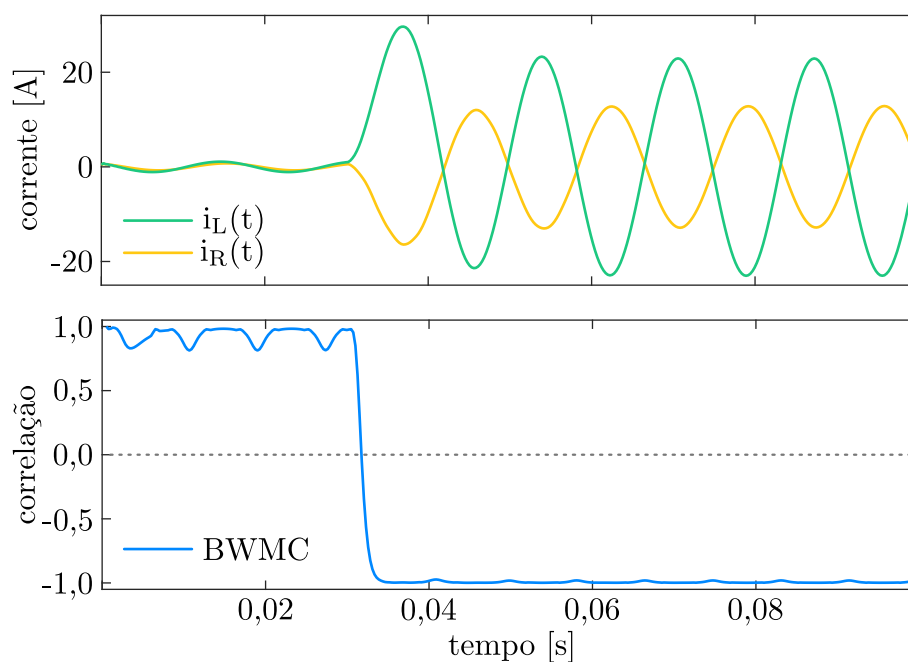


Figura 4.28: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta interna no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional máxima

4.12.2 Faltas externas

As figuras 4.29 e 4.30, por sua vez, apresentam respectivamente as correntes da fase A dos terminais e os respectivos coeficientes de BWMC calculados com MC para as faltas externas com as componentes unidirecionais amortecidas mínima e máxima.

Pode-se observar que, tanto para a falta externa com a componente unidirecional amortecida máxima como para a falta externa com componente unidirecional amortecida mínima, os coeficientes de BWMC ficam positivos durante toda a simulação.

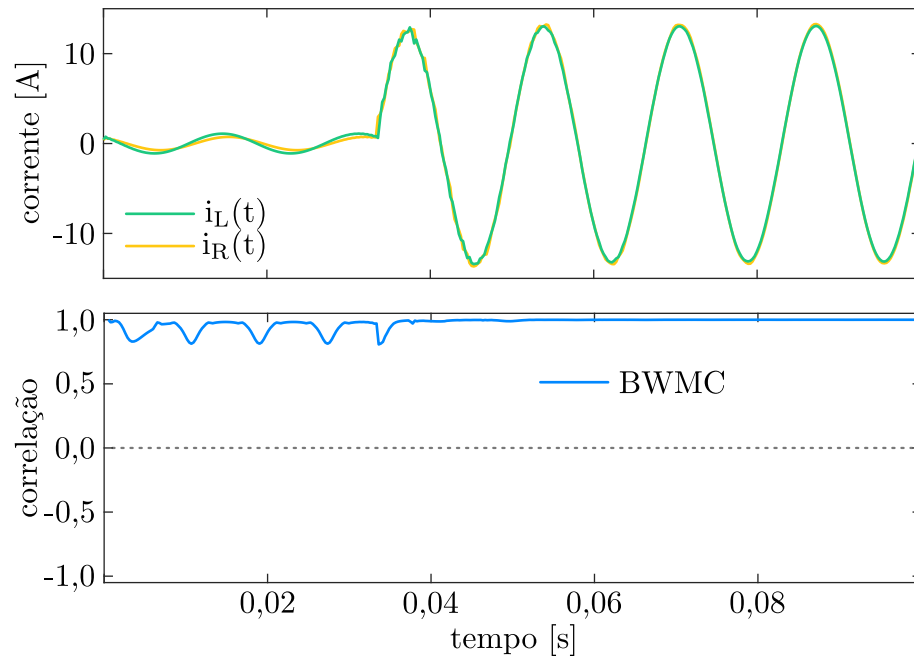


Figura 4.29: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta externa no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional mínima

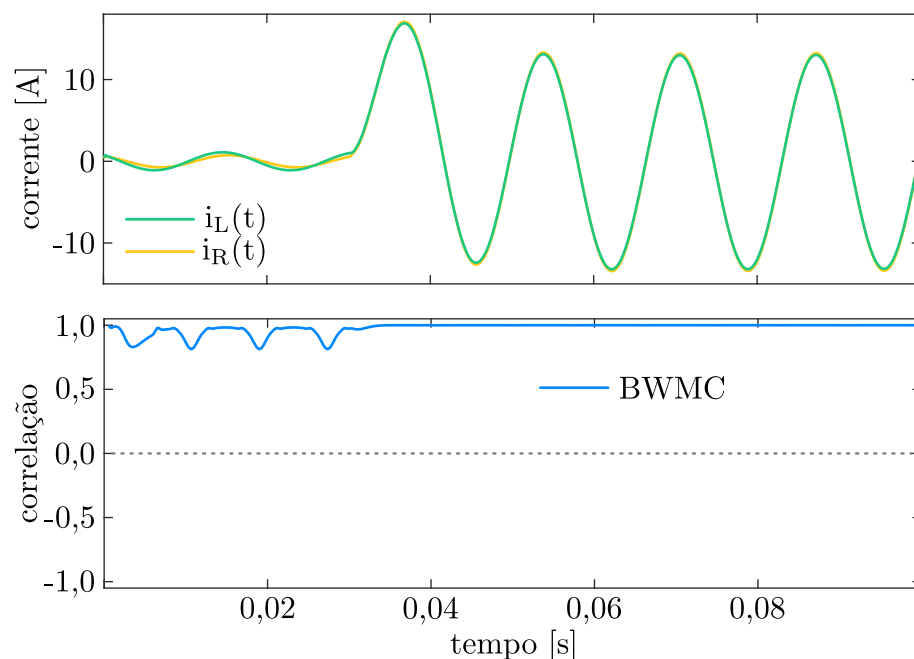


Figura 4.30: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta externa no sistema de 440 [kV] com componente unidirecional máxima

Isso acontece pois, por conta de a falta ser externa, os sinais de corrente continuam com sentidos iguais, independentemente da magnitude da componente unidirecional. Dessa

forma, esses resultados indicam e atestam que o algoritmo apresentado nesta pesquisa não é significativamente afetado pela componente aperiódica que se faz presente no transitório das correntes de falta.

Tal como comentado anteriormente, pode-se observar que, durante as faltas externas, os coeficientes de BWMC tornam-se mais constantes em comparação com o período de pré-falta. Isso ocorre pois, quando a falta externa se inicia, independentemente da componente unidirecional, as correntes de falta externa de baixa impedância são significativamente maiores do que a corrente capacitiva, que por sua vez é relevante apenas na pré-falta.

4.13 Influência da modelagem das linhas

Por fim, a última análise deste capítulo teve por objetivo verificar como a modelagem da linha protegida no ATP afeta o método de proteção proposto.

Neste programa computacional, os dois modelos de LT com parâmetros distribuídos mais utilizados para a elaboração de estudos de transitórios eletromagnéticos são o modelo apresentado em (MARTÍ, 1982), identificado como “JMarti”, e o modelo de Bergeron. A principal diferença entre esses dois modelos se deve ao fato de que o modelo JMarti leva em conta a variação dos parâmetros distribuídos da LT com a frequência, enquanto o modelo Bergeron considera tais parâmetros como constantes (ZANETTA JR., 2020).

Tipicamente, a modelagem adotada para a linha é de considerável importância para estudos de transitórios de manobra de linha (energização e religamento), que têm por objetivo verificar quais as máximas sobretensões resultantes de aberturas e fechamentos dos disjuntores. Nesse contexto, o modelo de Bergeron é mais empregado pois gera sobretensões mais acentuadas (ZANETTA JR., 2020). Entretanto, para a simulação de transitórios de falta, a modelagem da LT (parâmetros variantes ou invariantes com a frequência) não provoca variações significativas nos resultados. Dessa forma, os algoritmos de proteção testados com os sinais de falta das simulações não costumam apresentar diferenças de desempenho a depender do modelo utilizado para a LT.

Nesta pesquisa, os sistemas de 440 [kV] (linha protegida Bom Jardim - Água Azul) e 500 [kV] com *weak infeed* (linha protegida Zona Oeste - Angra dos Reis) tiveram suas linhas modeladas com o modelo JMarti, enquanto as linhas adicionais dos blocos 1 e 2 e do sistema com oscilação de potência foram modeladas com o modelo Bergeron. Independentemente do modelo e da linha, o algoritmo BWMC proposto apresentou o desempenho esperado (rapidez, precisão e robustez) em todos os casos.

Ainda assim, para verificar a influência do modelo em uma mesma LT, foram simuladas seis faltas internas no sistema de 500 [kV] Zona Oeste - Angra considerando-se, para essa análise, o modelo Bergeron ao invés do JMarti.

O algoritmo BWMC proposto foi simulado em todas as novas faltas, com o tamanho recomendado de MC ($N = 32$ amostras) para os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R . Em todas as faltas, para todas as fases, os tempos de *trip* foram exatamente os mesmos, evidenciando que de fato o modelo da LT protegida não influencia o desempenho do algoritmo proposto.

Nesse contexto, a figura 4.31 por fim apresenta as correntes dos terminais da fase A e os respectivos coeficientes de BWMC para uma das faltas simuladas com os dois modelos. Pode-se observar que, tanto para a corrente do terminal local como para a corrente do terminal remoto como para os coeficientes de BWMC, os valores associados com cada modelo (JMarti e Bergeron) são praticamente os mesmos.

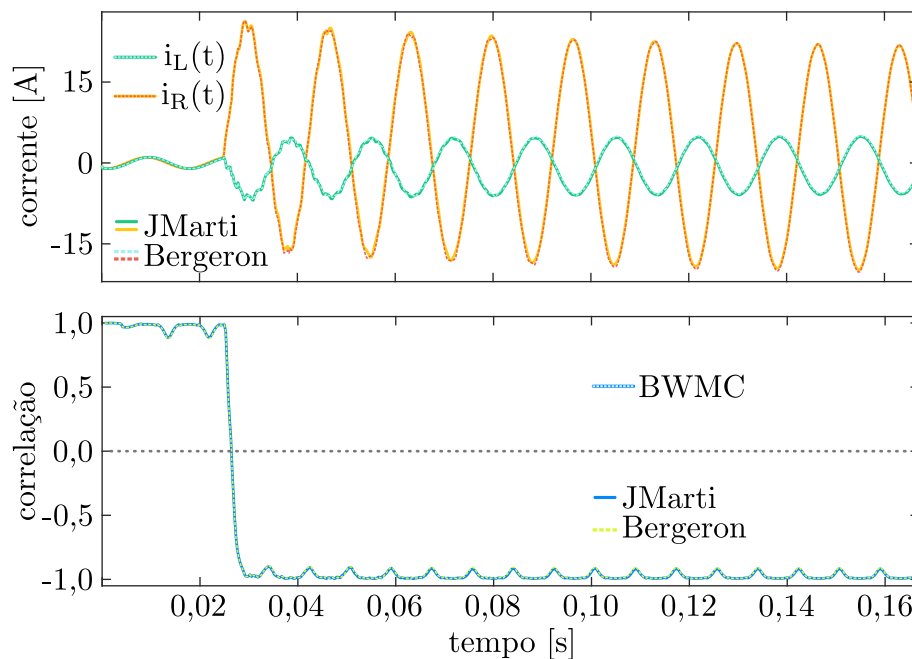


Figura 4.31: Correntes nos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (MC: $N = 32$) para falta interna no sistema de 500 [kV] considerando-se os modelos de linha de parâmetros variantes e invariantes com a frequência

Para essa falta, o tempo de *trip* do algoritmo foi de 1,562 [ms]. Além disso, a diferença média entre os coeficientes de BWMC calculados a partir das correntes obtidas com cada modelo foi de 0,0034, enquanto a maior diferença (em valor absoluto) entre um valor de $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ calculado com amostras de corrente obtidas com o modelo JMarti e um valor de $\text{BWMC}(\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R)$ calculado com amostras de corrente obtidas com o modelo Bergeron foi de 0,0159. Esse resultado indica, portanto, que a modelagem da LT (considerando-se apenas estes dois modelos consolidados) não influencia significativamente o algoritmo.

5 Implementação e testes em tempo real

Todos os resultados obtidos nas simulações, apresentados no capítulo anterior, mostram que o algoritmo de proteção piloto de LTs proposto neste trabalho é eficiente, rápido, seguro e confiável para proteger diversas linhas em diferentes condições. Dessa forma, este capítulo tem por objetivo apresentar a implementação da solução de proteção proposta e os testes em tempo real conduzidos para verificar o desempenho experimental do algoritmo e corroborar os resultados das simulações.

As próximas seções apresentam, portanto, o esquema de *hardware-in-the-loop* (HiL) utilizado para a realização dos testes em tempo real, composto por uma caixa de testes Omicron CMC 256 e um IED customizado compatível com a norma IEC 61850, aspectos relativos à implementação e aos tempos de processamento do algoritmo e finalmente os resultados dos testes.

Foram utilizados, nos testes em tempo real, tanto sinais de falta obtidos nas simulações do sistema de 440 [kV] como sinais de campo registrados pelos IEDs de quatro LTs de 500 [kV] existentes do Sistema Interligado Nacional (SIN), em oito eventos de falta reais ocorridos entre 2017 e 2019.

5.1 Descrição do esquema experimental de testes

A figura 5.1 ilustra o arranjo de HiL considerado para a realização dos testes em tempo real e da verificação experimental do algoritmo apresentado.

O IED possui, em sua estrutura interna, uma *merging unit* que coleta e digitaliza os valores amostrados provenientes dos canais de entrada segundo o protocolo *generic object oriented substation event* (GOOSE) - *sampled values* (SV), previsto na norma IEC 61850. Além disso, o IED também possui uma unidade central de processamento (CPU) industrial de alto desempenho, conforme descrito em detalhes na referência (PELLINI et al., 2013). Este dispositivo pode ser utilizado para a implementação de diversos algoritmos de proteção, controle e automação de sistemas elétricos de potência.

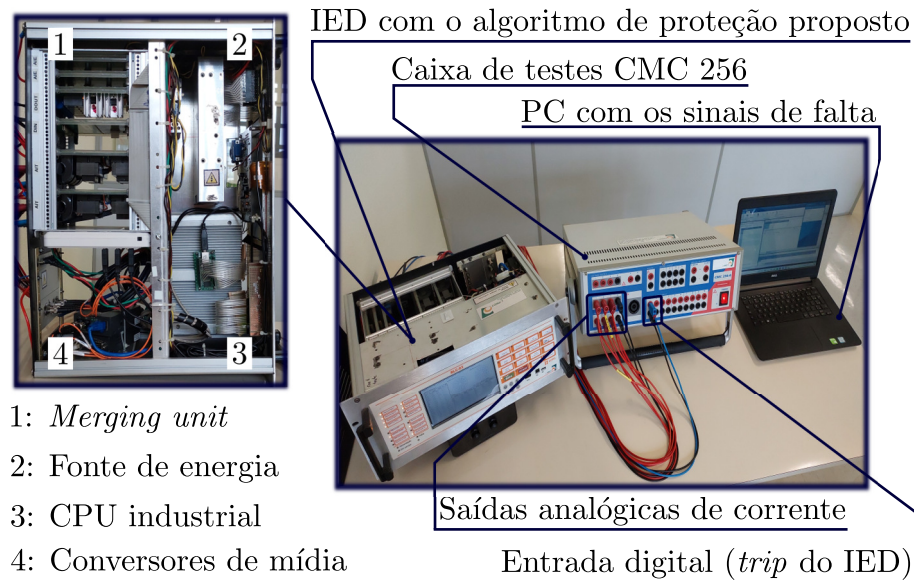


Figura 5.1: Esquema de HiL utilizado para os testes experimentais do algoritmo

Antes do início de cada teste, o operador utiliza o computador (PC) para carregar na memória da caixa de testes CMC 256 os valores dos sinais das correntes de falta (dos dois terminais da LT protegida) do caso a ser testado. Quando finalmente o teste é iniciado, por meio do programa *Advanced TransPlay*, a caixa sintetiza os sinais de corrente do caso e os envia para as entradas de corrente analógicas do IED em tempo real.

O IED, por sua vez, amostra os sinais de corrente com a frequência de 3,84 [kHz] (que conforme mencionado anteriormente, corresponde a 64 amostras por ciclo de 60 [Hz]) e processa a lógica do método proposto em seu sistema operacional.

O algoritmo foi implementado na linguagem de programação ANSI C, por meio do *L•PROT Framework* (LPF), proposto e detalhado em (PELLINI, 2010). O LPF é um arcabouço de *software* que possui três programas principais: o pré-processador, o compilador e o interpretador. Em conjunto, esses programas constituem um ambiente de desenvolvimento orientado ao usuário e à aplicação, que providencia flexibilidade para a criação e implementação de diversos blocos que executam funções e algoritmos, a serem aplicados com distintas configurações e com várias finalidades.

Quando o algoritmo detecta uma falta interna, a saída de *trip* do IED é ativada e enviada para a caixa de testes CMC 256. Além disso, quando a saída digital de *trip* é ativada pelo algoritmo, o LPF registra o evento de *trip* e captura oscilografias contendo os sinais de corrente e os valores de BWMC calculados ao longo do tempo do teste. Dessa forma, é possível analisar os resultados de tempo de *trip* do algoritmo com precisão.

A figura 5.2 apresenta, desse modo, um diagrama ilustrativo do arranjo de HiL utilizado nos testes em tempo real do método de proteção apresentado.



Figura 5.2: Diagrama ilustrativo do arranjo de HiL utilizado para os testes

5.2 Implementação e tempos de processamento

A etapa do algoritmo proposto que requer maior número de operações de ponto flutuante (FLOPS), e conseqüentemente maior carga computacional, é o cálculo das medianas dos vetores/*buffers* de amostras de correntes dos terminais \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , necessário para a determinação dos coeficientes de BWMC($\mathbb{I}_L, \mathbb{I}_R$) nas três fases da LT protegida.

O cálculo das medianas está associado com maior complexidade computacional pois, para que tais medidas estatísticas sejam computadas corretamente, os *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R devem estar ordenados. Porém, como os vetores de amostras encontram-se repletos por zeros durante a inicialização do algoritmo, e como a cada nova amostragem, apenas uma nova amostra integra os *buffers* circulares, foi desenvolvida e implementada uma rotina de cálculo de medianas que rastreia e atualiza as posições de cada amostra $i_{L,k}$ e $i_{R,k}$ nos respectivos vetores ordenados, dispensando reordenações e reduzindo a complexidade global do algoritmo. Essa rotina de cálculo de medianas encontra-se apresentada com maiores detalhes no Apêndice A.

Com essa maneira de se calcular as medianas dos vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , e atualizando o valor da corrente diferencial máxima i_D a cada amostragem de modo a não necessitar ordenações do vetor de amostras de corrente diferencial \mathbb{I}_{op} , o algoritmo proposto possui complexidade computacional de tempo $O(N)$, em todos os cenários.

Como a frequência de amostragem do IED é de 64 amostras por ciclo, a lógica do algoritmo de proteção deve ser executada em um tempo de processamento Δt_{CPU} menor do que um período de amostragem completo, $T_a = 260,42$ [μs].

O IED possui uma CPU industrial com *clock* de 1,6 [GHz] e memória RAM da ordem de 1,0 [GB]. Nesse processador, o interpretador do LPF indicou que os tempos de processamento médios da versão do algoritmo implementada em linguagem C são, para cada tamanho N dos *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R e considerando as três fases:

- QC (N = 16 amostras): $\Delta t_{\text{CPU}} = 32,87 \text{ } [\mu\text{s}]$ (12,62% de T_a);
- MC (N = 32 amostras): $\Delta t_{\text{CPU}} = 73,94 \text{ } [\mu\text{s}]$ (28,39% de T_a); e
- CC (N = 64 amostras): $\Delta t_{\text{CPU}} = 144,80 \text{ } [\mu\text{s}]$ (55,60% de T_a).

Pode-se observar que, para os três tamanhos considerados dos vetores contendo as amostras de corrente dos terminais da linha, nas três fases, o tempo de processamento da versão implementada do algoritmo proposto é suficientemente menor do que um período de amostragem. Além disso, observa-se também que os resultados medidos pelo LPF atestam que a complexidade computacional da versão implementada do método de proteção proposto cresce de maneira linear com o tamanho N.

Realizando-se uma regressão linear com os valores de tempo de processamento medidos pelo LPF, obtém-se a relação apresentada pela equação (5.1), onde $\Delta t_{\text{CPU}}(N)$ é dado em $[\mu\text{s}]$. O erro médio entre os valores de $\Delta t_{\text{CPU}}(N)$ estimados por tal relação em relação aos medidos efetivamente pelo interpretador é de 2,91%.

$$\Delta t_{\text{CPU}}(N) = 2,3151 \cdot N - 2,56 \quad (5.1)$$

Dessa forma, esses resultados indicam e comprovam que o método proposto é possível de ser implementado em *hardware* convencional.

Comenta-se, também, que o algoritmo proposto ainda poderia ser executado no processador do IED do LPF caso fossem utilizados, além dos valores de BWMC para as três fases, os coeficientes de BWMC das correntes de sequência zero, uma vez que, a depender da codificação e da implementação computacional, os tempos de processamento aumentariam em até 40%, aproximadamente.

5.3 Testes com sinais de faltas simuladas

Os sinais de corrente de 30 das faltas simuladas no sistema de 440 [kV] foram carregados na memória da caixa de testes CMC 256 e utilizados nos primeiros testes em tempo real do algoritmo BWMC proposto.

Para as faltas externas testadas, não foram verificadas quaisquer falhas de segurança, isto é, não foram registrados eventos de *trip* por parte do algoritmo. Para as faltas internas, por outro lado, não foram verificadas quaisquer falhas de operação, na medida em que foram verificados eventos de *trip* após os instantes de início das faltas.

Assim, para esses casos, os tempos de *trip* médios e máximos, calculados diretamente a partir das oscilografias e dos registros de eventos fornecidos pelo LPF (sem considerar os atrasos da saída digital de *trip*) para cada tamanho N (QC: um quarto de ciclo, MC: meio ciclo e CC: um ciclo completo), foram respectivamente iguais a:

- QC: 0,662 [ms] e 7,292 [ms];
- MC: 1,023 [ms] e 8,437 [ms]; e
- CC: 2,020 [ms] e 16,25 [ms].

A diferença nos tempos de *trip* obtidos nos testes em tempo real e dos obtidos nas simulações (tabela 4.3) foi de +0,052 [ms], para todos os casos. Esta diferença corresponde a 20% de um período de amostragem, $T_a = 0,260$ [ms], e ela existe pois os instantes de amostragem do IED em tempo real são diferentes dos instantes de amostragem dos sinais da simulação. Ainda assim, observa-se que as diferenças são consideravelmente menores do que um período de amostragem completo.

Observa-se também que o algoritmo não apresentou quaisquer falhas de segurança ou operação e que os tempos de *trip* obtidos nos testes têm mesma magnitude dos obtidos nas condições das simulações iniciais. Dessa forma, esses resultados comprovam que o algoritmo proposto apresentou o desempenho esperado nos testes em tempo real.

Além disso, também não foram observadas falhas do algoritmo proposto nos testes em tempo real considerando faltas internas e externas nos casos críticos de saturação dos TCs, ruídos e desalinhamento entre as amostras.

Vale comentar, também, que as diferenças entre os instantes de amostragem do teste em tempo real e da simulação *offline* foram as mesmas pois a duração de todos os sinais das faltas simuladas é a mesma em todos os casos. Com isso, a caixa de testes inicia a síntese dos sinais exatamente nos mesmos instantes para todas as faltas.

Se a duração dos casos fosse diferente (como ocorre nos casos das faltas reais, discutidos na próxima seção), a caixa de testes iria ajustar o instante de início da síntese dos sinais em instantes diferentes. Isso ocorre pois os casos do *Advanced TransPlay* têm uma duração total fixa, que corresponde ao período de síntese dos sinais (duração do caso de falta propriamente dita) e a um período que antecede o início efetivo do caso, cuja duração depende do intervalo de tempo efetivo da síntese dos sinais do caso a ser reproduzido. Assim, nessa condição, as diferenças entre os tempos de *trip* dos testes experimentais e das simulações apresentariam variações entre cada caso de falta testado.

5.4 Testes com sinais de faltas reais

Por fim, o algoritmo proposto foi testado com dados provenientes das oscilografias capturadas por IEDs de campo contendo as correntes dos terminais de 4 LTs reais do SIN, em oito eventos de falta (2 faltas por linha).

As quatro linhas possuem 500 [kV] de tensão, e seus comprimentos são:

- Linha 1: 366,37 [km] (terminal L na região Norte e terminal R na região Nordeste);
- Linha 2: 290,93 [km] (terminais L e R na região Norte);
- Linha 3: 321,72 [km] (terminais L e R na região Nordeste); e
- Linha 4: 248,57 [km] (terminais L e R na região Centro-Oeste).

Vale mencionar, também, que as linhas 1, 2 e 4 possuem compensação série (DI SANTO; ALBERTINI; TIFERES, 2022). A tabela 5.1, localizada a seguir, apresenta as características de cada uma das oito faltas consideradas nos testes. O local de cada falta é definido como a distância do ponto de falta ao terminal L.

Tabela 5.1: Características dos casos de falta reais

Falta	Linha	Tipo	Local [km]	Causa	Data	Hora
1.1	1	CN	200,90	Queimada	24/09/2018	12:32
1.2	1	BC	356,79	Queimada	07/09/2019	13:23
2.1	2	ACN	71,93	Queimada	04/09/2017	17:19
2.2	2	ABC	138,19	Queimada	05/10/2017	17:25
3.1	3	CN	162,70	Descarga atmosférica	22/03/2019	19:50
3.2	3	AN	141,58	Descarga atmosférica	17/11/2019	14:08
4.1	4	AN	161,01	Excrementos de ave	03/12/2018	22:24
4.2	4	BN	36,15	Descarga atmosférica	31/12/2019	14:31

Tal como nos testes com os sinais das faltas simuladas, o algoritmo com os casos de falta reais foi testado primeiramente em simulações *offline* e em seguida no esquema de HiL. Além disso, como em todos os casos anteriores, as correntes secundárias foram ajustadas para o valor de 5,0 [A], de forma que $i_M = 1,5$ [A]. Foram considerados os tamanhos de um quarto de ciclo (QC), meio ciclo (MC) e um ciclo completo (CC) para os tamanhos N dos vetores de amostras \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R .

Os tempos de *trip* em cada caso, para a fase em que a falta foi detectada com maior rapidez, tanto nas simulações como nos **testes**, encontram-se na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Tempos de *trip* do algoritmo proposto, em [ms], para cada falta, nas simulações e nos testes em tempo real

Falta	(QC: N = 16)		(MC: N = 32)		(CC: N = 64)	
	Simulação	Teste	Simulação	Teste	Simulação	Teste
1.1	1,006	1,042	1,527	1,562	2,569	2,604
1.2	1,296	1,302	1,556	1,563	3,640	3,646
2.1	0,519	0,521	1,040	1,041	2,081	2,083
2.2	3,384	3,385	3,905	3,906	4,686	4,687
3.1	3,254	3,385	4,035	4,166	8,462	8,593
3.2	1,296	1,302	2,077	2,083	2,337	2,344
4.1	0,729	0,781	1,250	1,302	2,031	2,083
4.2	1,927	2,083	2,448	2,604	5,312	5,469

É possível observar que as diferenças entre os tempos de *trip* obtidos nas simulações e nos testes em tempo real são diferentes para cada caso. Conforme mencionado anteriormente, isso ocorre pois os casos têm durações distintas. Além disso, os ruídos presentes nos sinais de campo são amplificados à medida com que a caixa de testes executa interpolações para a síntese dos sinais de corrente em tempo real.

Também, após a amostragem, o IED realiza uma filtragem passa-baixas para respeitar o critério de Nyquist. Portanto, os sinais de corrente vistos pelo IED em tempo real apresentam diferenças em relação aos sinais originais, carregados na memória da caixa de testes. Com isso, os valores de BWMC calculados em tempo real apresentam variações em relação aos coeficientes de BWMC calculados pelo algoritmo no decorrer da simulação.

A diferença média entre os tempos de *trip* obtidos nos testes em tempo real e nas simulações foi de +0,049 [ms], que corresponde a 18,8% de um intervalo de amostragem. As diferenças mínima e máxima foram de +0,001 (2.2) e 0,157 [ms] (4.2). Vale comentar que os tempos de *trip* dos testes não consideram os atrasos mecânicos da saída de *trip*, pois estes são uma característica do IED e não da implementação ou da função de proteção. Ainda assim, para o IED utilizado, o atraso da saída digital de *trip* pode variar entre 1 e 3 [ms].

Dessa forma, em todos os casos e com todos os três tamanhos considerados para os *buffers* \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R , os tempos de *trip* obtidos nos testes com os casos de falta reais indicam que o algoritmo proposto apresentou desempenho dentro do esperado.

Nesse contexto, a figura 5.3 apresenta as correntes dos terminais L e R e os coeficientes de BWMC (calculados com o tamanho de MC) da fase A ao longo do tempo (tanto os valores originais como os processados pelo IED em tempo real) para o caso de falta 2.2.

É possível observar que as correntes vistas pelo algoritmo em tempo real, após a amostragem e filtragem realizadas pelo IED, apresentam diferenças. Além disso, nota-se que os valores de BWMC após a falta também apresentam variações, uma vez que os sinais de corrente são diferentes. Entretanto, ainda assim, observa-se que os valores de BWMC, tanto na simulação como no teste, detectam e respondem de maneira rápida e precisa à falta interna na LT protegida.

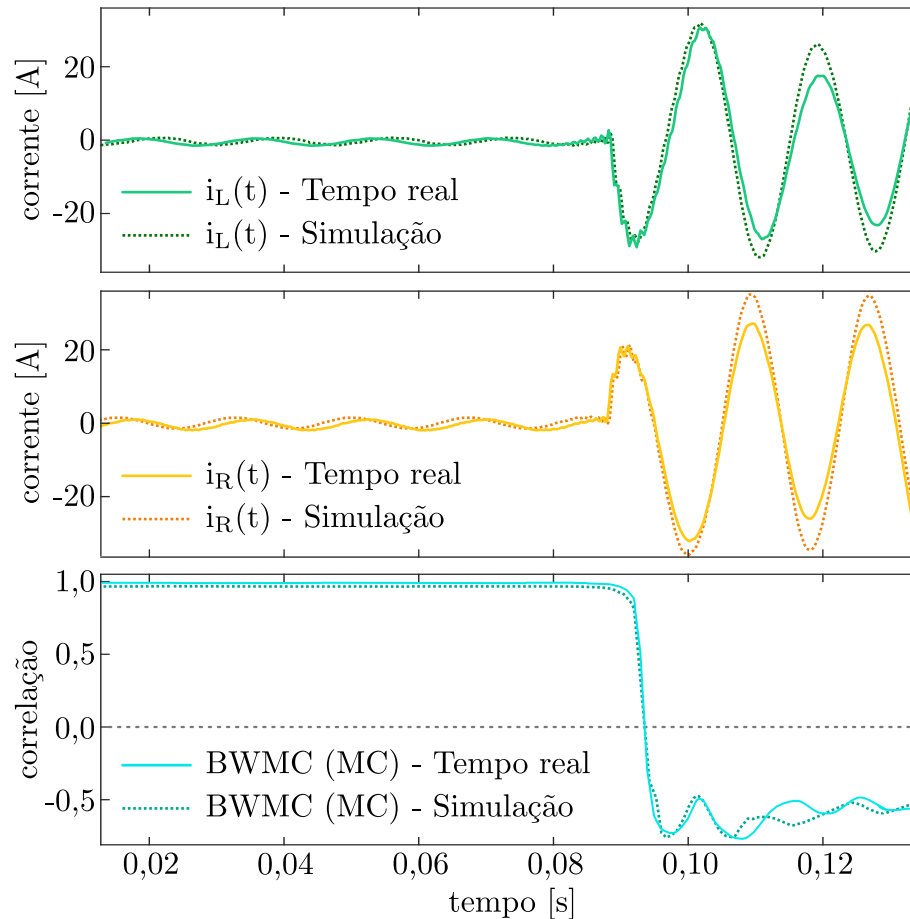


Figura 5.3: Correntes dos terminais (fase A) e coeficientes de BWMC (calculados com MC) ao longo do tempo para a falta 2.2, tanto do teste em tempo real como da simulação desse caso

Para a mesma falta 2.2, na qual o tempo de *trip* do teste em tempo real considerando os vetores \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R com tamanho de meio ciclo (MC) foi de 3,906 [ms], o tempo de *trip* da função de proteção de distância do IED localizado em campo, calculados a partir dos arquivos COMTRADE correspondentes, sem considerar o tempo de abertura do disjuntor, foi de 20,098 [ms].

Considerando-se os atrasos de comunicação dos cabos OPGW dessa linha ($\Delta t_{\text{Canal}} = 1,455$ [ms]) e de processamento do algoritmo com MC ($\Delta t_{\text{CPU}} = 0,074$ [ms]), a falta seria efetivamente detectada pelo algoritmo proposto implementado no IED utilizado nos

testes após 5,435 [ms], que corresponde a um tempo de *trip* aproximadamente 73% mais rápido do que o obtido pela função de proteção de distância implementada no equipamento presente no campo (sem considerar, nessa comparação, o tempo de abertura e extinção do arco elétrico pelo disjuntor, que é uma variável que independe da solução de proteção empregada).

Estendendo este mesmo raciocínio para as outras faltas, tem-se que:

- **Falta 1.1:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (3,468 [ms]) seria aproximadamente 86% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (24,510 [ms]);
- **Falta 1.2:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (3,469 [ms]) seria aproximadamente 82% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (19,608 [ms]);
- **Falta 2.1:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (2,570 [ms]) seria aproximadamente 88% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (21,569 [ms]);
- **Falta 3.1:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (5,849 [ms]) seria aproximadamente 80% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (29,411 [ms]);
- **Falta 3.2:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (3,766 [ms]) seria aproximadamente 86% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (26,471 [ms]);
- **Falta 4.1:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (2,619 [ms]) seria aproximadamente 89% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (24,872 [ms]); e
- **Falta 4.2:** tempo de *trip* do algoritmo proposto (com MC) considerando os atrasos (3,921 [ms]) seria aproximadamente 77% menor do que o apresentado pela função de distância do IED de campo (16,923 [ms]).

Esses resultados demonstram que, apesar de requisitar comunicação em tempo real e sincronismo entre aquisição de amostras nos terminais, os métodos de proteção piloto tal como o proposto neste trabalho podem ser vantajosos ante algoritmos de proteção de distância sob o ponto de vista de velocidade de detecção de faltas internas.

Comenta-se, em complementação, que a maior rapidez do algoritmo apresentado em relação aos métodos de proteção de distância seria também verificada mesmo em situações com atrasos significativos decorrentes dos equipamentos de telecomunicações intermediários, que segundo a norma IEC 60834-1 (CIGRE, 2001), podem chegar a 5 [ms].

Portanto, este capítulo demonstrou que o algoritmo proposto é possível de ser implementado em *hardware* convencional, que a complexidade computacional da solução é linear em função do tamanho dos vetores de amostras das correntes dos terminais e confirmou que o método baseado na BWMC detecta faltas internas em tempo real com precisão e rapidez, tal como constatado nas simulações iniciais.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um algoritmo de proteção piloto de LTs de energia elétrica cuja lógica de detecção de faltas internas à linha protegida é baseada em coeficientes de *biweight midcorrelation* (BWMC) entre os vetores contendo as amostras coletadas nos terminais da linha.

A proteção piloto tipicamente é vantajosa ante outras abordagens tais como funções de distância pois os métodos de proteção por canal piloto geralmente conferem detecção de faltas internas rápida e efetiva, não requerem quaisquer parâmetros relativos à linha protegida e não são afetados por faltas de alta impedância ou oscilações de potência.

Além disso, os sistemas de comunicação e sincronismo em tempo real existentes em SEs modernas, juntamente com os IEDs existentes no mercado e normas abertas tais como a IEC 61850, permitem com que novas alternativas para a proteção piloto de LTs sejam desenvolvidas, de modo a tornar os sistemas de proteção modernos ainda mais eficientes, seguros e confiáveis.

O algoritmo proposto integra a classe de algoritmos de proteção piloto baseados em correlação e similaridade, os quais, dentre as diversas abordagens encontradas na literatura, podem ser vantajosos pois podem ser facilmente generalizados para LTs com características distintas utilizando arranjos de proteção piloto convencionais, não requerem amostras de tensão e não demandam frequências de amostragem incompatíveis com a maioria dos IEDs comerciais.

Entretanto, as soluções existentes (correlações de Pearson, Spearman e Kendall e similaridades de cosseno e estrutural) podem ser afetadas em situações críticas envolvendo saturação de TCs, medidas com altos níveis de ruídos e desalinhamento entre amostras, o que pode levar a falhas de segurança (atuação indevida) em eventos de faltas externas.

Dessa forma, a contribuição desta pesquisa consiste na proposta de uma solução que, diferentemente dos métodos existentes, é robusta para não apresentar falhas em tais situações críticas. Tal robustez contra medidas ruidosas e inconsistentes, que podem ocorrer em tais condições críticas, existe pois o algoritmo proposto é baseado na BWMC, que é uma métrica de correlação baseada essencialmente nas medianas dos vetores de amostras.

Os resultados indicam que, nas situações críticas mencionadas, o algoritmo proposto apresenta de fato maior robustez e precisão para detectar faltas internas e diferenciá-las das faltas externas em relação às demais alternativas consideradas. Ao mesmo tempo, o método proposto possui velocidade de detecção de faltas (tempos de *trip*) similar às abordagens da literatura que se mostraram mais rápidas (correlação de Pearson e similaridade de cosseno).

Todas as simulações indicam que a solução proposta neste trabalho pode detectar quaisquer faltas internas, independentemente do tipo ou da resistência, em LTs distintas. Vale mencionar também que o algoritmo não requer nenhuma informação da linha protegida e nenhum parâmetro de ajuste além do valor da corrente diferencial mínima, que é ajustada conforme o secundário dos TCs.

Por fim, os testes em tempo real do algoritmo proposto realizados com um sistema de HiL contendo um IED customizado e uma caixa de testes comprovam que o método apresentado é possível de ser implementado em *hardware* convencional e corroboram os resultados obtidos nas simulações, que atestam que o método proposto é rápido e efetivo para detectar faltas internas, nas mais diversas condições.

Portanto, o algoritmo desenvolvido e proposto nesta pesquisa configura uma alternativa rápida, eficiente, segura e confiável para a proteção piloto de LTs, que é uma técnica que vem sendo utilizada em escala cada vez maior em SEs de energia digitais de transmissão e industriais que compõem as redes elétricas modernas.

Apêndice A – Rotina de cálculo de medianas

Conforme mencionado no Capítulo 5, o cálculo de medianas é tipicamente complexo do ponto de vista computacional pois requer que os dados estejam ordenados. Assim, a carga computacional do algoritmo de proteção piloto baseado na BWMC é diretamente dependente da carga de processamento da rotina de ordenação e cálculo de medianas utilizada, uma vez que os valores de BWMC dependem das medianas dos *buffers* de valores amostrados de corrente \mathbb{I}_L e \mathbb{I}_R nas três fases da linha protegida.

A ordenação de um conjunto de dados é um problema em que o número de operações matemáticas de ponto flutuante (FLOPS) que o processador deve executar depende diretamente dos dados em si, pois o *buffer* de valores que se deseja ordenar pode estar totalmente ordenado (melhor cenário), parcialmente ordenado (cenários médios) ou ordenado na ordem contrária à desejada (pior cenário). Dessa forma, as rotinas de ordenação geralmente são avaliadas de acordo com sua complexidade computacional em função da quantidade de elementos a serem ordenados em cada um desses cenários.

No algoritmo proposto, os valores de BWMC são recalculados a cada nova amostragem, após o valor mais recente integrar os respectivos vetores na posição previamente ocupada pelo valor mais antigo, conforme explicado nos capítulos anteriores. Além disso, os vetores contendo os valores amostrados encontram-se preenchidos com zeros antes da execução do algoritmo. Desse modo, como apenas um novo valor é atualizado a cada amostragem, não é necessário reordenar o vetor de dados completo: basta determinar a posição em que o novo valor ocupa no vetor previamente ordenado. Assim, com o propósito de reduzir a carga computacional do algoritmo de proteção de linhas proposto, foi desenvolvida a rotina computacional de cálculo de medianas apresentada neste Apêndice.

A rotina desenvolvida tem por objetivo determinar a mediana de um conjunto de dados na implementação de *buffer* circular genericamente representado por \mathbf{x} , que possui N elementos x_k , com k variando entre 1 e N , conforme a equação (A.1). Os valores x_k são iguais a zero na inicialização da rotina (antes da primeira amostragem).

$$\mathbf{x} = \{x_1 \cdots x_k \cdots x_N\} \quad (\text{A.1})$$

Cada novo valor amostrado entra em \mathbf{x} na posição p , que é o ponteiro para a posição da amostra mais recente. A rotina ainda possui dois outros vetores de tamanho N , utilizados para a atualização da ordenação de \mathbf{x} , que são:

- $\mathbf{Pos} = \{P_1 \cdots P_k \cdots P_N\}$, em que P_k representa a posição do valor x_k na lista ordenada em ordem crescente de \mathbf{x} ; e
- \mathbf{x}_o , que representa o vetor \mathbf{x} ordenado de forma crescente (o elemento da k -ésima posição de \mathbf{x}_o , $x_{o,k}$, recebe a amostra de \mathbf{x} situada na posição P_k).

Na inicialização da rotina, \mathbf{x}_o é inicializado com todos seus elementos iguais a zero, enquanto \mathbf{Pos} é inicializado com os números de 1 a N de forma crescente. Quando uma nova amostra entra no vetor \mathbf{x} , na posição p , a rotina determina, por meio de verificações e trocas dos valores de \mathbf{Pos} e \mathbf{x}_o , qual a posição da amostra mais recente em \mathbf{x}_o . Por fim, a mediana é calculada como sendo o valor central de \mathbf{x}_o caso N seja ímpar e como a média aritmética entre os dois valores centrais de \mathbf{x}_o caso contrário.

Os melhores casos, que implicam em menores números de FLOPS, são aqueles em que a amostra nova entra exatamente na posição ordenada. Os piores casos, por outro lado, ocorrem quando o valor amostrado mais recente entra em uma das extremidades ($p = 1$ ou $p = N$) e precisa percorrer todo o conjunto de valores até a outra extremidade de \mathbf{x}_o . Os casos médios, por fim, são todas as condições entre o melhor e o pior cenário.

Com o auxílio do programa de contagem de FLOPS desenvolvido em (HANG, 2022), foram estimados, para cada cenário, o número de FLOPS demandados pela rotina de cálculo de medianas desenvolvida, em função de N . Nesse contexto, o número de FLOPS $T(N)$ da rotina de medianas estimado para os melhores casos, para os casos médios e para os piores casos são apresentados respectivamente nas equações (A.2), (A.3) e (A.4).

$$T(N) = \begin{cases} 6, & N \text{ par} \\ 2, & N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

$$T(N) = \begin{cases} 3 \cdot N + 3, & N \text{ par} \\ 3 \cdot N - 1, & N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

$$T(N) = \begin{cases} 6 \cdot N - 1, & N \text{ par} \\ 6 \cdot N - 5, & N \text{ ímpar} \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

É possível observar, a partir dessas relações, que a rotina de cálculo de medianas desenvolvida para o algoritmo de BWMC possui complexidade computacional $O(1)$ para os melhores casos e $O(N)$ tanto para os casos médios como para os piores casos. Assim, a complexidade global do algoritmo de proteção proposto é $O(N)$ em todos os cenários, conforme mencionado previamente (pois as outras operações necessárias para o cálculo da BWMC também são lineares em função de N).

A tabela A.1 apresenta, nesse contexto, as complexidades tanto da rotina desenvolvida como das de ordenação mais consolidadas atualmente, conforme descrito em (MOGHADDAM, 2021). Observa-se que, nos três cenários, a rotina desenvolvida apresenta menor complexidade em comparação com as demais.

Tabela A.1: Complexidades computacionais da rotina desenvolvida e de métodos convencionais consolidados de ordenação

Rotina	Melhor caso	Caso médio	Pior caso
Desenvolvida	$O(1)$	$O(N)$	$O(N)$
<i>Quick sort</i>	$O(N \cdot \log N)$	$O(N \cdot \log N)$	$O(N^2)$
<i>Merge sort</i>	$O(N \cdot \log N)$	$O(N \cdot \log N)$	$O(N \cdot \log N)$
<i>Heap sort</i>	$O(N \cdot \log N)$	$O(N \cdot \log N)$	$O(N \cdot \log N)$
<i>Bubble sort</i>	$O(N)$	$O(N^2)$	$O(N^2)$

Assim, segundo o critério de complexidade computacional, a rotina desenvolvida é a mais apropriada para ser utilizada no método proposto neste trabalho, que requer cálculos de medianas executados a cada nova aquisição de valores amostrados.

Cabe notar, no entanto, que diferentemente dos métodos convencionais e consolidados, a rotina desenvolvida possui aplicação em apenas situações em que um único valor novo entra no vetor a ser ordenado por vez e que são conhecidas as posições de cada elemento no conjunto de dados previamente ordenado.

Para melhor entendimento e visualização dos resultados da rotina de cálculo de medianas desenvolvida para ser aplicada no algoritmo de proteção apresentado, considere uma situação exemplo em que deseja-se calcular, a cada nova amostragem, a mediana de um vetor \mathbf{x} , implementado segundo um *buffer* circular, com tamanho $N = 6$ elementos.

Suponha que, nesse exemplo, o conjunto de dados X , que possui doze valores inteiros sorteados utilizando um gerador de números aleatórios, segundo a equação (A.5), representa amostras de uma determinada grandeza coletadas ao longo do tempo.

$$X = \{-5; 13; -63; -40; -38; 60; 4; -7; 47; 3; 5; -46\} \quad (\text{A.5})$$

A cada amostragem, o valor mais recente entra no vetor \mathbf{x} e a rotina desenvolvida atualiza o vetor com as posições de cada elemento na lista ordenada em ordem crescente, \mathbf{Pos} , atualiza o vetor com os valores de \mathbf{x} ordenados nessa mesma ordem, \mathbf{x}_o , e re-calcula a mediana de \mathbf{x} , que é a saída de interesse.

A tabela A.2 apresenta, portanto, os vetores \mathbf{x} , \mathbf{Pos} e \mathbf{x}_o para cada amostragem, juntamente com os correspondentes valores de mediana do vetor \mathbf{x} . Em cada uma das amostragens, indicadas por n , o valor mais recente encontra-se destacado em **negrito** nos vetores da rotina.

Tabela A.2: Resultados da rotina de medianas para os valores exemplo

n	\mathbf{x}	\mathbf{Pos}	\mathbf{x}_o	Mediana(\mathbf{x})
0	{0; 0; 0; 0; 0; 0}	{1; 2; 3; 4; 5; 6}	{0; 0; 0; 0; 0; 0}	0,0
1	{ -5 ; 0; 0; 0; 0; 0}	{ 1 ; 2; 3; 4; 5; 6}	{ -5 ; 0; 0; 0; 0; 0}	0,0
2	{-5; 13 ; 0; 0; 0; 0}	{1; 3; 4; 5; 6; 2 }	{-5; 0; 0; 0; 0; 13 }	0,0
3	{-5; 13; -63 ; 0; 0; 0}	{ 3 ; 1; 4; 5; 6; 2}	{ -63 ; -5; 0; 0; 0; 13}	0,0
4	{-5; 13; -63; -40 ; 0; 0}	{3; 4 ; 1; 5; 6; 2}	{-63; -40 ; -5; 0; 0; 13}	-2,5
5	{-5; 13; -63; -40; -38 ; 0}	{3; 4; 5 ; 1; 6; 2}	{-63; -40; -38 ; -5; 0; 13}	-21,5
6	{-5; 13; -63; -40; -38; 60 }	{3; 4; 5; 1; 2; 6 }	{-63; -40; -38; -5; 13; 60 }	-21,5
7	{ 4 ; 13; -63; -40; -38; 60}	{3; 4; 5; 1 ; 2; 6}	{-63; -40; -38; 4 ; 13; 60}	-17,0
8	{4; -7 ; -63; -40; -38; 60}	{3; 4; 5; 2 ; 1; 6}	{-63; -40; -38; -7 ; 4; 60}	-22,5
9	{4; -7; 47 ; -40; -38; 60}	{4; 5; 2; 1; 3 ; 6}	{-40; -38; -7; 4; 47 ; 60}	-1,5
10	{4; -7; 47; 3 ; -38; 60}	{5; 2; 4 ; 1; 3; 6}	{-38; -7; 3 ; 4; 47; 60}	3,5
11	{4; -7; 47; 3; 5 ; 60}	{2; 4; 1; 5 ; 3; 6}	{-7; 3; 4; 5 ; 47; 60}	4,5
12	{4; -7; 47; 3; 5; -46 }	{ 6 ; 2; 4; 1; 5; 3}	{ -46 ; -7; 3; 4; 5; 47}	3,5

Por fim, a figura A.1 apresenta a codificação da rotina de cálculo de medianas desenvolvida neste trabalho em linguagem de programação ANSI C. Esse mesmo código foi programado no *L•PROT Framework* (LPF) para a implementação do algoritmo de proteção piloto proposto no IED visando a elaboração dos testes em tempo real, com a única diferença sendo a identificação dos tipos das variáveis, *float* e *long*, que no LPF são identificadas respectivamente como LPFFLOAT e LPFLONG.

```
1 float Mediana(float *x, long *Pos, float *xo, long p, long N) {
2
3     long i, tempP, aux = 0;
4     float tempX;
5
6     for (i = 0; i < N; i++) {
7         xo[i] = x[Pos[i]];
8         if (Pos[i] == p) {
9             aux = i;
10        }
11    }
12
13    i = aux;
14
15    if (aux != 0) {
16        while (xo[i] < xo[i - 1]) {
17            tempX = xo[i];
18            xo[i] = xo[i - 1];
19            xo[i - 1] = tempX;
20            tempP = Pos[i];
21            Pos[i] = Pos[i - 1];
22            Pos[i - 1] = tempP;
23            if (i == 1) {
24                break;
25            }
26            else {
27                i--;
28            }
29        }
30    }
31    if (aux != N - 1) {
32        while (xo[i] > xo[i + 1]) {
33            tempX = xo[i];
34            xo[i] = xo[i + 1];
35            xo[i + 1] = tempX;
36            tempP = Pos[i];
37            Pos[i] = Pos[i + 1];
38            Pos[i + 1] = tempP;
39            if (i == N - 2) {
40                break;
41            }
42            else {
43                i++;
44            }
45        }
46    }
47
48    if (N % 2) { return(xo[N / 2]); }
49
50    else { return((xo[N / 2 - 1] + xo[N / 2]) / 2); }
51
52 }
53
```

Figura A.1: Implementação da rotina de cálculo de medianas em C

Referências

ALI, I. et al. Communication Modeling for Differential Protection in IEC-61850-Based Substations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 1, p. 135-142, 2018.

ALMEIDA, M. L. S. *Proteção diferencial de linhas de transmissão baseada no plano alfa de potências complexas*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2016.

ALMEIDA, M. L. S.; SILVA, K. M. Transmission lines differential protection based on an alternative incremental complex power alpha plane. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 11, n. 1, p. 10-17, 2017.

ANDANAPALLI, K; BISWAL, M. An enhanced power swing and symmetrical fault discrimination logic for integrated power network. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 30, n. 7, p. 1-17, 2020.

ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. 1^a Ed. Piscataway, Estados Unidos: IEEE Press, 1998.

AZIZ, M. M. A. et al. Transmission Lines Differential Protection Based on the Energy Conservation Law. *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 11, p. 1865–1872, 2008.

BOLANDI, T. G. et al. Impedance-Differential Protection: A New Approach to Transmission-Line Pilot Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 6, p. 2510-2518, 2015.

BORNARD, P.; BASTIDE, J. C. A Prototype of Multiprocessor Based Distance Relay. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 2, p. 491-498, 1982.

CHAMIA, M.; LIBERMAN, S. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines – Development, Design and Application. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-97, n. 6, p. 2104-2116, 1978.

CHAUHAN, K.; REDDY, M. V.; SODHI, R. A Novel Distribution-Level Phasor Estimation Algorithm Using Empirical Wavelet Transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 10, p. 7984–7995, 2018.

CHECCHI, V. et al. Incorporating Temperature Variations Into Transmission-Line Models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 4, p. 2189–2196, 2011.

- CHEN, L. et al. Similarity Comparison Based High-Speed Pilot Protection for Transmission Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 2, p. 938-948, 2018.
- CIGRE. Applications of IEC 61850 Standard to Protection Schemes. *Working Group B5.36*, 2013.
- CIGRE. Protection using Telecommunications. *Joint Working Group 34/35.11*, 2001.
- DANTAS, D. T.; PELLINI, E. L.; MANASSERO JR., G. Time-Domain Differential Protection Method Applied to Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 6, p. 2634-2642, 2018.
- DAS, S. et al. Estimating Zero-Sequence Line Impedance and Fault Resistance Using Relay Data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 2, p. 1637-1645, 2019.
- DAVYDOVA, N.; SHCHETININ, D.; HUG, G. Optimization-Based Settingless Algorithm Combining Protection and Fault Identification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 35, n. 5, p. 2136-2148, 2020.
- DI SANTO, S. G.; ALBERTINI, A. D. R.; TIFERES, R. R. Optimization-Based Fault Location Algorithm for Series-Compensated Power Transmission Lines. *IEEE Access*, v. 10, n. 1, p. 46864-46877, 2022.
- FOLKERS, R. Determine Current Transformer Suitability using EMTP Models. In: *26th Annual Western Protective Relay Conference*. Washington, Estados Unidos, 1999. p. 1-18.
- GIRGIS, A. A.; MAKRAM, E. B. Application of adaptive Kalman filtering in fault classification, distance protection, and fault location using microprocessors. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 1, p. 301-309, 1988.
- HAGINOMORI, E. et al. *Power System Transient Analysis: Theory and Practice using Simulation Programs (ATP-EMTP)*. 1^a Ed. Chichester, Reino Unido: Wiley, 2016.
- HANG, Q. *Counting the Floating Point Operations (FLOPS) - MATLAB Central File Exchange*, 2022. Disponível em <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50608-counting-the-floating-point-operations-flops>>.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power System Relaying*. 4^a Ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2014.
- HOSSAIN, M.; LEEVONGWAT, I.; RASTGOUFARD, P. Revisions on Alpha Plane for Enhanced Sensitivity of Line Differential Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 6, p. 3260-3262, 2018.

- IBARRA, L. et al. A Fourier-Based Phasor Estimator With a Modified Moving Average Filter and Its Application in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 18, n. 1, p. 698-706, 2022.
- IEEE. IEEE Guide for Application of Digital Line Current Differential Relays Using Digital Communication. *IEEE Std. C37.243-2015*, p. 1-72, 2015.
- IEEE. IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. *IEEE Std. C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996)*, p. 1-48, 2008.
- JIA, K. et al. Spearman Correlation-Based Pilot Protection for Transmission Line Connected to PMSGs and DFIGs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 7, p. 4532-4544, 2021.
- JIA, K. et al. Transient current similarity based protection for wind farm transmission lines. *Applied Energy*, v. 225, p. 42-51, 2018.
- JIN, X. et al. High Speed Digital Distance Relaying Scheme Using FPGA and IEC 61850. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 5, p. 4383-4393, 2018.
- LEI, A. et al. Equivalent traveling waves based current differential protection of EHV/UHV transmission lines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 97, p. 282-289, 2018.
- LIU, S. et al. High-speed distance relaying using least error squares method and testing with FPGA. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 13, n. 16, p. 3591-3600, 2019.
- MARTÍ, J. R. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 1, p. 147-157, 1982.
- MOGHADDAM, S. S.; MOGHADDAM, K. S. On the Performance of Mean-Based Sort for Large Data Sets. *IEEE Access*, v. 9, n. 1, p. 37418-37430, 2021.
- ONS. *Indicadores de desempenho do SIN - Número de perturbações ocorridas na Rede Básica*, 2022. Disponível em <<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento-paineis.aspx>>.
- ONS. *O sistema em números - Extensão da Rede Básica de transmissão*, 2022. Disponível em <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>.
- ONS. *Procedimentos de Rede - Módulo 2 - Submódulo 2.11 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*, 2021. Disponível em <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>.

- PELLINI, E. L. et al. Custom distribution feeder recloser IED with high impedance protection function. In: *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*. Estocolmo, Suécia, 2013, p. 1-4.
- PELLINI, E. L. *Um arcabouço para aplicações em tempo real em sistemas de potência*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2010.
- REIS FILHO, F. A. *Esquema de proteção baseado no algoritmo de Chamia-Liberman e análise comparativa com relés de distância para linhas de transmissão compensadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.
- RISTANOVIC, D. et al. Bus Differential Protection in Industrial Systems With Generators Connected Directly to the Main Distribution Bus. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 4, p. 3574-3583, 2016.
- SALEH, S. A.; OZKOP, E. Digital Differential Protection for Solid-State Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 57, n. 4, p. 3474-3486, 2021.
- SILVA, K. M.; BAINY, R. G. Generalized Alpha Plane for Numerical Differential Protection Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 6, p. 2565-2566, 2016.
- SANTOS, R. C. dos. *Algoritmo baseado em redes neurais artificiais para a proteção de distância de linhas de transmissão*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.
- TANG, L. et al. A New Differential Protection of Transmission Line Based on Equivalent Travelling Wave. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 32, n. 3, p. 1359-1369, 2017.
- TEIMOURZADEH, A. et al. High Impedance Single-Phase Faults Diagnosis in Transmission Lines via Deep Reinforcement Learning of Transfer Functions. *IEEE Access*, v. 9, n. 1, p. 15796-15809, 2021.
- TIFERES, R. R.; DANTAS, D. T.; MANASSERO JR., G. Application and Evaluation of Time-Domain Differential Protection based on Bayesian Inference to HVDC Lines. In: *The 16th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP)*. Newcastle, Reino Unido, 2022, p. 1-5.
- TIFERES, R. R.; MANASSERO JR., G. Time-Domain Differential Protection of Transmission Lines based on Bayesian Inference. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 37, n. 3, p. 1569-1577, 2022.
- TIFERES, R. R.; MANASSERO JR., G. Transmission Line Distance Protection Algorithm based on Bayesian Inference. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 1, p. 1-15, 2022.

- VIANNA, P. L.; MANASSERO JR., G. Time-domain distance protection of transmission lines based on the conic section general equation. *Electric Power Systems Research*, v. 205, p. 1-11, 2022.
- VIANNA, P. L. *Proteção de distância no domínio do tempo baseada na equação geral da seção cônica*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2021.
- WEN, M. et al. An energy differential relay for long transmission lines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 55, p. 497-502, 2014.
- WILCOX, R. R. *Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing*. 4^a Ed. San Diego, Estados Unidos: Academic Press, 2017.
- YANG, Z. et al. Improved Euclidean Distance Based Pilot Protection for Lines with Renewable Energy Sources. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Early Access, p. 1-10, 2022.
- ZANETTA JR., L. C. *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. 1^a Ed. São Paulo, Brasil: Editora Livraria da Física, 2006.
- ZANETTA JR., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. 2^a Ed. São Paulo, Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2020.
- ZHAN, L. et al. Clarke Transformation-Based DFT Phasor and Frequency Algorithm for Wide Frequency Range. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 1, p. 67-77, 2018.
- ZHANG, G. et al. Waveform Similarity-Based Robust Pilot Protection for Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 37, n. 3, p. 1856-1865, 2022.
- ZHANG, J. et al. Improved Smoothing Frequency Shifting and Filtering Algorithm for Harmonic Analysis With Systematic Error Compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 66, n. 12, p. 9500-9509, 2019.
- ZHENG, L. et al. A Novel Structural Similarity Based Pilot Protection for Renewable Power Transmission Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 35, n. 6, p. 2672-2681, 2020.
- ZHENG, L. et al. Cosine Similarity Based Line Protection for Large Scale Wind Farms. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 68, p. 5990-5999, 2021.
- ZHENG, L. et al. Cosine Similarity Based Line Protection for Large Scale Wind Farms Part II - the Industrial Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 69, n. 3, p. 2599-2609, 2022.
- ZIEGLER, G. *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*. 2^a Ed. Berlim, Alemanha: Publicis Publishing, 2012.