



**PROTEÇÃO DIFERENCIAL CRUZADA DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO DE CIRCUITO DUPLO USANDO ONDAS
VIAJANTES DE CORRENTE**

BRUNO CARLOS RIBEIRO MONTEIRO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Proteção Diferencial Cruzada de Linhas de Transmissão de Circuito
Duplo Usando Ondas Viajantes de Corrente

Bruno Carlos Ribeiro Monteiro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OB-
TENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvinho Lopes, DSc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Kleber Melo e Silva, DSc. (ENE-UnB)
(Co-orientador)

Prof. Francisco Damasceno Freitas, DSc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Mário Oleskovicz, DSc. (ENE-USP-São Carlos)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, Novembro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

MONTEIRO, BRUNO CARLOS RIBEIRO

Proteção Diferencial Cruzada de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo Usando Ondas Viajantes de Corrente. [Distrito Federal] 2018.

xxv, 84p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção Diferencial Cruzada

4. Linha de Transmissão de Circuito Duplo

I. ENE/FT/UnB

2. Ondas Viajantes

4. ATP

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MONTEIRO, B. C. R (2018). Proteção Diferencial Cruzada de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo Usando Ondas Viajantes de Corrente. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-713/2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 84p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Carlos Ribeiro Monteiro

TÍTULO: Proteção Diferencial Cruzada de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo Usando Ondas Viajantes de Corrente.

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Bruno Carlos Ribeiro Monteiro

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Aos meus pais, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por ter me concedido o dom da vida, saúde e sabedoria para superar todos os desafios desta trajetória.

Aos meus pais, Francisco e Laura, pelo amor, carinho com que me criaram e pelo forte apoio durante toda a minha trajetória acadêmica. Eles são os principais responsáveis pelas minhas conquistas.

Ao professor Felipe, pela sua ótima orientação e dedicação. Seu apoio, paciência e interesse permitiram chegar ao fim de mais esta etapa, mesmo com todas dificuldades e obstáculos durante esta trajetória.

À minha namorada Márcia, por ser minha amiga e companheira de todos os momentos e pela paciência, compreensão, incentivo e carinho que foram essenciais para a conclusão deste Mestrado.

À CAPES pelo apoio e suporte financeiro para a realização desta pesquisa, sem a qual a presente dissertação não seria possível.

A todos os meus amigos, colegas e familiares, que estiveram presentes e me deram suporte, conselhos e não me deixaram abaixar a cabeça. O apoio deles permitiu focar nos meus objetivos e me dedicar ao meu estudo.

RESUMO

Nesta dissertação, apresenta-se uma avaliação do desempenho da proteção diferencial cruzada para linhas de circuito duplo, baseada em medições de sinais de ondas viajantes de corrente em apenas um terminal. Como ferramentas de modelagem, utilizou-se o software ATP (*Alternative Transients Program*) em conjunto com o software Matlab para simular, modelar e verificar a atuação da proteção para diferentes cenários de falta.

Considerando que ambas as linhas do circuito duplo possuem os mesmos comprimentos, o algoritmo identifica, corretamente, as faltas como sendo interna ou externamente às linhas do circuito duplo, assegurando a confiabilidade e a segurança da proteção. Caso a falta ocorra internamente ao circuito duplo, o método opera e classifica as fases defeituosas na linha com falta. Caso a falta ocorra externamente, o algoritmo de proteção não opera. O método de proteção também identifica faltas inter-circuitos, em que as fases de ambos os circuitos estão envolvidas no defeito, e seleciona as fases defeituosas para diversos tipos de faltas. O algoritmo de proteção diferencial cruzada baseado em ondas viajantes extrai as ondas de corrente medidas por ambos transformadores de corrente instalados no terminal monitorado e usa apenas as primeiras frentes de ondas incidentes para implementar sua lógica de *trip* da proteção.

Os resultados foram obtidos por meio de simulações pontuais e em massa. As primeiras foram realizadas para verificar a atuação da proteção para os principais tipos de faltas. Já as simulações em massa têm a finalidade de verificar o desempenho da proteção para um número expressivo de faltas quando diversos parâmetros de falta são variados, como resistência de falta, localização da falta, comprimento das linhas de transmissão de circuito duplo, dentre outros. Os resultados demonstram que o algoritmo de proteção detecta corretamente diversos cenários de faltas internas em poucos milissegundos após a ocorrência do defeito, apresentando boa confiabilidade e sensibilidade.

Palavras-chave: Proteção diferencial cruzada, linhas de transmissão de circuito duplo, tempo de atuação do relé, ondas viajantes.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the performance of a one-terminal traveling wave-based cross-differential protection algorithm for double-circuit lines which uses only current measurements. ATP (*Alternative Transients Program*) and Matlab were used as simulation tools and they were used to simulate, model and verify the performance of the protection system over several fault scenarios.

Assuming that both circuits of the monitored double-circuit line have the same lengths, the algorithm reliably classifies faults as internal or external, assuring the algorithm security and reliability. If the fault is internal, the method operates, detecting the faulted phases of the faulted line, otherwise, the algorithm properly restrains. The protection algorithm also covers inter-circuit faults, in which phases of both circuits get involved in the fault, and select the faulted phases for several fault scenarios. The traveling wave-based cross-differential protection function extracts current traveling wave information from measurements taken from both current transformers installed at the monitored terminal and uses only the first incident wavefronts to implement the tripping logic.

Keywords: Cross-differential protection, double-circuit lines, relay operation time, traveling waves.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Glossário	viii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos do Trabalho e Contribuições	4
1.4 Organização do Texto	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	6
2.1 Proteção de Distância em Linhas de Circuito Duplo	6
2.2 Proteção Diferencial Cruzada em Linhas de Circuito Duplo	8
2.3 Proteção Baseada em OVs em Linhas de Circuito Duplo	12
Capítulo 3 – Fundamentos sobre Ondas Viajantes	15
3.1 Princípios da Proteção de Sistemas Elétricos	15
3.2 Modelagem Matemática da LT	17
3.2.1 OVs em LTs com Perdas	17
3.2.2 OVs em LTs sem Perdas	19
3.3 Ferramentas Matemáticas para a Obtenção das OVs	21
3.4 Propagação de OVs em Descontinuidades de LTs de Circuito Duplo	25
3.5 Componentes Modais	29
3.6 Síntese do Capítulo	30

Capítulo 4 – Algoritmo Implementado	31
4.1 LTs de Circuito Duplo	31
4.2 Proteção Diferencial Cruzada Baseada em Fasores	32
4.2.1 Proteção Diferencial Cruzada Tradicional	32
4.2.2 Proteção Diferencial Cruzada Percentual	34
4.3 Mapeamento da Proteção Percentual Cruzada para o Domínio das OV's	35
4.4 Implementação Numérica do Algoritmo	37
4.4.1 Aplicação do Filtro DS aos Sinais de Corrente	37
4.4.2 Detecção das primeiras OV's incidentes	38
4.4.3 Cálculo das OV's de Loop de Corrente e Seleção das OV's mais Significativas	39
4.4.4 Identificação do Circuito com Falta e Seleção das Fases Defeituosas	40
4.4.5 Lógica de Trip do Algoritmo Proposto	42
4.5 Casos Exemplos	45
4.5.1 Falta no Ponto L1F3	47
4.5.2 Falta no Ponto L4F5	49
4.6 Síntese do Capítulo	50
Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados	52
5.1 O Software ATP	52
5.1.1 A Linguagem MODELS	54
5.2 Simulações Pontuais	56
5.2.1 Simulação Pontual 1: Curto-Circuito Interno A-T na LT 1, no Ponto L1F3 com Ângulo de Incidência de 90°	57
5.2.2 Simulação Pontual 2: Curto-Circuito Interno BC-T na LT 1, no Ponto L1F3 com Ângulo de Incidência de 30°	59
5.2.3 Simulação Pontual 3: Curto-Circuito Interno CA-T na LT 2, no Ponto L2F3 com Ângulo de Incidência de 60°	61
5.2.4 Simulação Pontual 4: Curto-Circuito Interno AB na LT 1, no Ponto L1F5 com Ângulo de Incidência de 45°	63
5.2.5 Simulação Pontual 5: Curto-Circuito Externo C-T, no Ponto L4F3 com Ângulo de Incidência de 45°	65
5.3 Simulações em Massa	66
5.3.1 Simulação em Massa 1: Curto-circuito $A_1B_2 - T$ aplicado de 0,5% a 99% do Comprimento da LT com $R_{terra} = 10 \Omega$ e $R_{F1F2} = 0 \Omega$	69
5.3.2 Simulação em Massa 2: Curto-circuito A_1B_2 com Valor do SIR_1 Variando de 0,2 a 10 com $R_{terra} = 10^{12} \Omega$ e $2 \cdot R_{F1F2} = 10 \Omega$	71
5.3.3 Simulação em Massa 3: Curto-circuito $A_1B_2 - T$ com Impedância para a Terra Variando de 0Ω a 100Ω e $R_{F1F2} = 0 \Omega$	73

5.3.4	Simulação em Massa 4: Curto-circuito A_1B_2 com Comprimento das LTs Variando de 40 km a 200 km com $R_{terra} = 10^{12} \Omega$ e $2 \cdot R_{F1F2} = 10 \Omega$. . .	75
5.4	Síntese do Capítulo	78
Capítulo 6 – Conclusão e Propostas		79
Referências Bibliográficas		81

LISTA DE FIGURAS

3.1	Elemento infinitesimal da LT com perdas.	18
3.2	Elemento infinitesimal da LT sem perdas.	20
3.3	Resposta do filtro DS a uma variação em degrau na entrada (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2016).	24
3.4	Respostas do filtro DS a variações em rampa na entrada.	24
3.5	Ondas viajantes em linhas de circuito duplo - falta interna.	27
3.6	Ondas viajantes em linhas de circuito duplo - falta externa.	27
4.1	Circuito Duplo Tradicional.	33
4.2	Fluxograma do algoritmo.	44
4.3	Sistema teste de 230 kV proposto pelo IEEE Power System (IEEE PSRC, 2004).	45
5.1	Modelo para aplicação de faltas no sistema teste simulado: (a) Faltas clássicas; (b) Faltas inter-circuitos.	54
5.2	Sistema teste de 230 kV utilizado nas simulações computacionais: implementação no ATPDraw.	56
5.3	Correntes de fase medidas (Caso 1): (a) na LT 1 (b) na LT 2.	57
5.4	Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 1): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2}	58
5.5	OVs mais significativas (Caso 1): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21}	58
5.6	Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 1).	59
5.7	Correntes de fase medidas (Caso 2): (a) na LT 1 (b) na LT 2.	60
5.8	Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 2): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2}	60

5.9	OVs mais significativas (Caso 2): (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21}	60
5.10	Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 2).	61
5.11	Correntes de fase medidas (Caso 3): (a) na LT 1 (b) na LT 2.	62
5.12	Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 3): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2}	62
5.13	OVs mais significativas (Caso 3): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21}	62
5.14	Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 3).	63
5.15	Correntes de fase medidas (Caso 4): (a) na LT 1 (b) na LT 2.	63
5.16	Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 4): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2}	64
5.17	OVs mais significativas (Caso 4): (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21}	64
5.18	Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 4).	64
5.19	Correntes de fase medidas (Caso 5): (a) na LT 1 (b) na LT 2.	65
5.20	Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 5): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2}	66
5.21	OVs mais significativas (Caso 5): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21}	66
5.22	Sistema de transmissão teste para simulações em massa	67
5.23	OVs mais significativas (Caso 1 simulação em massa): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21}	69
5.24	Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 1): (a) LT 1 (b)LT 2.	70
5.25	Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 1): (a) LT 1 (b)LT 2.	70
5.26	Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 1).	71
5.27	OVs mais significativas (Caso 2 simulação em massa): (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21}	72
5.28	Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 2): (a) LT 1 (b)LT 2.	72
5.29	Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 2): (a) LT 1 (b)LT 2.	73
5.30	Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 2).	73
5.31	OVs mais significativas (Caso 3 simulação em massa): (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21}	74

5.32	Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 3): (a) LT 1 (b)LT 2. . .	74
5.33	Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 3): (a) LT 1 (b)LT 2	75
5.34	Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 3).	75
5.35	OVs mais significativas (Caso 4 simulação em massa) : (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21}	76
5.36	Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 4): (a) LT 1 (b)LT 2. .	76
5.37	Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 4): (a) LT 1 (b)LT 2	77
5.38	Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 4).	78

LISTA DE TABELAS

1.1	Estatística de falta para diferentes equipamentos (PAITHANKAR; BHIDE, 2007)	2
4.1	Parâmetros adotados nas simulações	46
5.1	Tabela contendo os parâmetros do Sistema teste.	67
5.2	Parâmetros adotados nas simulações em massa.	68
5.3	Lista de casos utilizados nas simulações em massa.	68

GLOSSÁRIO

A_1B_2	Fase A circuito 1 e Fase B circuito 2.
$A_1B_2 - T$	Fase A circuito 1 e Fase B circuito 2 para Terra.
AB	Fases A e B.
AB-T	Fases A e B para Terra.
AC	Fases A e C.
AC-T	Fases A e C para Terra.
A-T	Fase A para Terra..
ATP	Alternative Transients Program.
ATPDraw	Interface gráfica do ATP.
BC	Fases B e C.
BC-T	Fases B e C para a Terra.
B-T	Fase B para Terra.
CC	Corrente Contínua.
C-T	Fase C para Terra.
EMTP	Eletromagnetic Transients Program.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System.
FILTRO DS	Filtro <i>Differentiator-Smoother</i> .
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
L1F3	Segundo ponto de aplicação de falta da linha 1.

L1F5	Terceiro ponto de aplicação de falta da linha 1.
L2F3	Segundo ponto de aplicação de falta da linha 2.
L2F5	Terceiro ponto de aplicação de falta da linha 2.
LT 1	Linha de Transmissão 1.
LT 2	Linha de Transmissão 2.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
OVs	Ondas Viajantes.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SIR	Source Impedance Ratio.
TC	Transformador de Corrente.
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo.
TWD	Transformada Wavelet Discreta.
TWDR	Transformada Wavelet Discreta Redundante.
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller.</i>

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Vive-se, atualmente, em uma sociedade cada vez mais dependente da energia elétrica. Equipamentos elétricos e eletrônicos de diversas formas, tamanhos e configurações estão fortemente presentes em nosso cotidiano, de modo que se espera que o suprimento de energia elétrica seja feito de forma contínua, confiável e com qualidade. O fornecimento e o consumo de energia elétrica é possível graças aos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, que se estendem por todo o território nacional e que se encontram operando continuamente. Dessa forma, compõe-se o Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual compreende um grande número de equipamentos e dispositivos que operam em harmonia para garantir o seu suprimento (MOLAS, 2014).

Apesar da busca pela excelência do serviço de fornecimento de energia elétrica por parte dos agentes e dos órgãos reguladores, os equipamentos dos Sistemas de Energia Elétrica (SEEs) estão constantemente sujeitos a falhas dos mais diversos tipos. Dentre os equipamentos mais importantes dos SEEs, têm-se as linhas de transmissão (LTs), as quais são as mais abundantes e responsáveis pela conexão física entre unidades geradoras, distribuidoras e consumidoras. A probabilidade da ocorrência de faltas varia entre os diversos equipamentos do sistema, sendo que todos são vulneráveis e sujeitos a mau funcionamento. Entretanto, a dimensão, a quantidade e a exposição das LTs as tornam muito mais suscetíveis às intempéries e ao vandalismo, de forma que, segundo Paithankar & Bhide (2007), elas são envolvidas em cerca da metade dos eventos de falta que ocorrem nos sistemas elétricos de potência. Estas estatísticas estão representadas na Tabela 1.1. Esta descontinuidade do funcionamento de linhas ou de outros equipamentos, por vezes, implica na interrupção do fornecimento para usuários residenciais, comerciais e industriais. Estes eventos de interrupção podem acarretar prejuízos financeiros tanto para o fornecedor, quanto para o consumidor de energia elétrica.

Tabela 1.1. Estatística de falta para diferentes equipamentos (PAITHANKAR; BHIDE, 2007)

Equipamento	Probabilidade de falta (%)
Linhas de transmissão	50%
Disjuntores	12%
TPs, TCs, relés, etc	12%
Transformadores	10%
Cabos subterrâneos	9%
Geradores	7%
Total	100%

Adiciona-se ao problema das faltas no sistema, o crescimento da demanda por energia elétrica. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o aumento no seu consumo, no Brasil, até 2020, é estimado em um valor médio de 4,8% ao ano (EPE, 2011). A fim de atender esse crescimento, faz-se necessário expandir e modernizar as instalações dos SEEs, o que acarreta no aumento da sua complexidade operacional. Isto é percebido quando se nota o crescente incremento de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Como as redes de transmissão estão se tornando maiores e mais complexas e carregadas do ponto de vista dos blocos de potência a serem transmitidos, os sistemas de proteção vêm se tornando cada vez mais importantes. Nesse contexto, os sistemas de proteção devem fornecer respostas cada vez mais rápidas, especialmente em SEEs com carregamento elevado, os quais operam próximos dos limites de estabilidade. Neste contexto, sabe-se que a proteção elétrica monitora constantemente o sistema elétrico de modo a garantir a continuidade do serviço, danos mínimos à vida em casos de falha e que perturbações sejam extintas rápida e apropriadamente, evitando-se o desencadeamento de black-outs de grandes proporções (MOLAS, 2014).

Paralelamente à necessidade de expansão crescente dos sistemas de transmissão, existem alguns obstáculos de ordem ambiental, técnica e financeira. Legislações ambientais cada vez mais rígidas promovem grandes empecilhos à construção de novas LTs. Áreas de proteção ambiental permanente, propriedades privadas e regiões com proteções ambientais específicas geram grandes dificuldades à construção de novos circuitos. Adicionalmente, os gastos envolvidos em estudo de impacto ambiental, compra de terras, estudos de viabilidade para definição do traçado da linha representam uma parcela considerável para implantação de novas linhas de transmissão (GOMES, 2014). Para contornar estes problemas, LTs de circuito duplo têm

sido cada vez mais usadas, pois são capazes de transferir mais potência com custo reduzido em relação à construção de novas LTs (SANTOS, 2007).

Apesar das vantagens das LTs de circuito duplo em relação à capacidade de transmissão de potência, elas apresentam desafios adicionais em relação à proteção quando comparadas às tradicionais linhas de circuito simples (SANTOS, 2007). As LTs de circuito duplo possuem taxas de falha consideravelmente mais elevadas do que as LTs de circuito simples por conta da proximidade dos condutores dos circuitos, especialmente quando esses compartilham uma mesma torre, tornando necessário o uso de sistemas de proteção capazes de eliminar quaisquer tipos de falta, rápida e apropriadamente para garantir a integridade dos SEEs. Além disto, o circuito duplo possui o efeito de acoplamento de sequência zero entre as linhas paralelas, existindo a possibilidade de influência sobre o desempenho das proteções tradicionais, a depender das topologias em questão (APOSTOLOV *et al.*, 2007). Tendo em vista esta problemática, este trabalho propõe fazer o mapeamento da proteção diferencial cruzada fasorial para o domínio das OV. Para tanto, modelou-se uma linha de transmissão de circuito duplo com o software *Alternative Transient Program* (ATP) e a lógica da proteção foi modelada com o auxílio de uma ferramenta computacional matemática. Para avaliar o desempenho da proteção baseada em OV, diferentes simulações pontuais e em massa foram realizadas, demonstrando as potencialidades da abordagem apresentada.

1.2 MOTIVAÇÃO

Segundo os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as LTs devem possuir dois sistemas de proteção inteiramente independentes, que são os sistemas de proteção unitária (ou restrita) e de proteção gradativa (ou irrestrita) (ONS, 2011). A proteção unitária recebe este nome, pois tem como função detectar e eliminar defeitos apenas no elemento protegido. Adicionalmente, ela deve ser capaz de detectar faltas em qualquer ponto da linha e ser capaz de eliminá-las em um tempo máximo de 120 ms (ONS, 2011). A proteção gradativa, por outro lado, elimina falhas em parte do elemento protegido, podendo ser ajustada para proteger áreas mais abrangentes considerando atrasos de tempo intencionais. A proteção de distância, por exemplo, é inerentemente gradativa, porém, quando suas zonas de sobrealcance são associadas a um esquema de teleproteção, é capaz de prover a proteção unitária para a

linha. Além disso, outros esquemas inerentemente unitários também são bastante utilizados, como é o caso da comparação de fases e a própria função diferencial (ONS, 2009; ONS, 2011).

Apesar da proteção de distância ser a mais utilizada, ela apresenta limitações para ser empregada nas LTs de circuito duplo. O efeito de acoplamento de sequência zero presente nestes sistemas de circuito duplo influencia bastante no desempenho dos relés de distância, sendo necessário o emprego de técnicas de compensação deste acoplamento (APOSTOLOV *et al.*, 2007). Para contornar esta limitação, a tecnologia tem avançado nas últimas décadas na implementação de relés numéricos microprocessados e de modernos sistemas de comunicação, tornando possível a aplicação da proteção diferencial longitudinal, mesmo para LTs longas. No entanto, a necessidade de canais de comunicação se mostra como um fator limitante de desempenho, a depender do sistema em questão (SHARAFI *et al.*, 2012). Como função alternativa, destaca-se a proteção diferencial cruzada.

A proteção diferencial cruzada se mostra como uma opção técnica e economicamente viável para a proteção de LTs de circuito duplo visto que não é afetada por acoplamento de sequência zero e por não requerer troca de dados entre os terminais monitorados. Estes fatos serviram como motivação para o desenvolvimento deste trabalho, assim como o interesse pela implementação da proteção diferencial baseada em OV, a qual é capaz de acelerar o tempo de detecção de faltas dos sistemas de proteção clássicos (baseados em grandezas fasoriais) para situações de faltas mais adversas. Estes defeitos mais adversos incluem faltas com ângulo de incidência não-próximos de zero (tornando as primeiras OV fáceis de serem detectadas) e resistências de falta relativamente pequenas, as quais não sofrem mudanças abruptas no tempo (ZHANG *et al.*, 2017).

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO E CONTRIBUIÇÕES

Os objetivos do presente trabalho consistem no mapeamento da proteção diferencial cruzada fasorial para o domínio das OV e na aplicação deste algoritmo na proteção de LTs de circuito duplo, demonstrando sua viabilidade a partir de simulações de falta realizadas via o software *ATP*. Nesse contexto, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Modelar e simular a lógica da proteção diferencial cruzada baseada em OV.

- Aplicar à lógica de proteção um algoritmo que permita identificar as fases defeituosas para as LTs do circuito duplo onde o defeito está ocorrendo.
- Avaliar o desempenho da lógica de proteção diferencial cruzada e validá-la por meio de simulações pontuais de falta e também por meio de simulações em massa.

As contribuições da pesquisa realizada foram apresentadas à comunidade em forma de publicações no tema, as quais são listadas a seguir:

- **MONTEIRO, B. C. R.**; MAGALHÃES JR, F.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Cross-Differential Protection for Double-Circuit Lines Using Current Traveling Waves. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. Niterói, Brasil: Maio, 2018
- MAGALHÃES JR, F.; **MONTEIRO, B. C. R.**; LOPES, F. V. Using Current Traveling Waves to Implement Directional Elements in Parallel Lines In: *Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Brasília, Brasil: Novembro, 2017

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como se segue:

No capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica abordando os principais trabalhos referentes à proteção de LTs, apresentando o estado da arte da proteção de linhas, tanto para os métodos clássicos (fasoriais) quanto para os métodos baseados em OV_s.

No capítulo 3, descrevem-se os princípios fundamentais das OV_s em LTs, abordando aspectos gerais e essenciais ao entendimento do método apresentado nesse trabalho.

No capítulo 4, os algoritmos implementados e seus ajustes são abordados.

No capítulo 5, os sistemas teste modelados no *ATP* são descritos e os resultados obtidos nas simulações computacionais são apresentados, destacando os pontos relevantes sobre a atuação da função de proteção implementada.

Por fim no capítulo 6, são apresentadas as conclusões a respeito dos resultados obtidos e propostas de trabalhos futuros, que poderão ser consideradas na continuidade da pesquisa.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante a elaboração desta dissertação, consultou-se uma grande variedade de materiais abordando a área de proteção de LTs. Foram consultadas diversas funções de proteção existentes na literatura, dentre as quais figuram as proteções de distância, diferencial longitudinal e diferencial cruzada, considerando também aplicações baseadas em OV's. Neste capítulo, é apresentada uma breve revisão do estado da arte acerca de alguns dos principais métodos de proteção nessas categorias, de modo a evidenciar suas vantagens e limitações no contexto da proteção de LTs de circuitos duplos.

2.1 PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE CIRCUITO DUPLO

Na literatura, encontram-se inúmeros trabalhos abordando o desempenho da proteção de distância, sendo este o método mais utilizado. No entanto, a função de distância apresenta limitações na sua aplicação em circuitos duplos. A principal limitação decorre do acoplamento de sequência zero entre circuitos, a qual influencia sobremaneira o desempenho dos relés, gerando problemas de sub ou sobre-alcance a depender da configuração do SEE monitorado. De fato, conforme Apostolov *et al.* (2007), o efeito de acoplamento de sequência zero em circuitos duplos é muito acentuado, variando de 50% a 70% da impedância própria da linha de sequência zero (Z_{LO}), ao passo que o efeito de acoplamento nas sequências positiva e negativa é pequeno, sendo geralmente desprezado. Assim, as medições de corrente dos relés devem ser compensadas na sequência zero de forma apropriada e por conta disto surgem os métodos de proteção de distância adaptados para sistemas de circuito duplo.

No trabalho de Izykowski & Bozek (2008) é proposto um método de proteção de distância para linhas de circuito duplo com o objetivo de compensar os efeitos negativos da resistência de falta (R_f) na operação do relé de proteção. O algoritmo faz uso dos sinais disponíveis

(sinais de tensão e corrente) em apenas um dos terminais do circuito duplo e utiliza-os para calcular um vetor de deslocamento (ΔZ) em tempo real. Este vetor ΔZ possui componentes resistivas e reativas (parte real e imaginária), e tem o efeito de promover o deslocamento da característica mho do relé de distância a depender dos sinais de tensão/corrente medidos no terminal monitorado. Desta forma, é feito um procedimento de proteção adaptativo passível de aplicação em linhas de circuito duplo. O algoritmo é validado por meio de simulações de um sistema de potência simplificado, constituído de linhas de circuito duplo com fontes e equivalentes de Thévenin em ambos os terminais. O método é eficaz, não requer cálculos complicados e nem medições de sinais do terminal remoto. As desvantagens do método se resumem ao fato do vetor ΔZ depender de medições de tensão e corrente, bem como dos parâmetros da linha para sua análise, de forma que incertezas em medições/parâmetros podem comprometer a eficiência do método.

No trabalho de Srivani & Vittal (2010) é apresentado um método de proteção de distância adaptativo aplicável para linhas de circuito duplo que possuem acoplamento mútuo de sequência zero. O relé foi implementado com a função de distância com curva característica quadrilateral para uma proteção em três zonas. As configurações do relé são ajustadas e adaptadas a depender da disponibilidade dos sinais de entrada. Por exemplo, caso o sinal de corrente de sequência zero para as linhas de circuito duplo esteja disponível, ele é utilizado para compensar totalmente o efeito de acoplamento mútuo. Se a corrente de sequência zero para linhas de circuito duplo não puder ser determinada, o algoritmo passa a verificar o estado de operação das linhas de circuito duplo e faz o cálculo de compensação de sequência zero a depender do estado de operação.

São dois os estados de operação típicos considerados: o primeiro caso ocorre quando ambas as LTs estão em operação. Por outro lado, o segundo caso é verificado quando uma das LTs está fora de operação e aterrada em ambos os terminais. Caso nem a corrente de sequência zero para linhas de circuito duplo, nem o estado de operação das linhas esteja disponível, o algoritmo usa um fator de compensação de sequência zero típico. O esquema de proteção proposto não requer medições de sinais do terminal remoto e garante uma operação confiável do relé de distância para todas as topologias de circuito duplo. No entanto, o algoritmo requer cálculos mais complexos e depende do conhecimento dos parâmetros da linha para fazer a correta compensação do acoplamento de sequência zero.

Até o momento, nesta seção, foram evidenciadas dificuldades da aplicação da proteção de distância em linhas de circuito duplo. Para contornar as limitações deste tipo de proteção, novas funções de proteção vêm sendo desenvolvidas, permitindo tempos de atuação mais rápidos, com maior sensibilidade e melhor seletividade. Neste contexto, surgem as funções de proteção alternativas, dentre as quais se incluem as proteções diferencial longitudinal e diferencial cruzada, bem como suas versões baseadas na teoria de OV's. Nesse trabalho, em virtude dos estudos estarem voltados majoritariamente para a proteção diferencial cruzada, maior destaque será dado a essas funções.

2.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL CRUZADA EM LINHAS DE CIRCUITO DUPLO

Sabe-se que a proteção diferencial cruzada tem como grande vantagem o fato de ser imune aos efeitos de acoplamentos mútuos de sequência zero. Outra grande vantagem deste tipo de proteção é não requerer a necessidade de canais de comunicação, pois consegue distinguir idealmente faltas internas de externas por meio da análise de correntes nos dois circuitos em um mesmo terminal. Com isso, os custos da proteção diferencial cruzada se tornam menores e o algoritmo se torna mais atrativo.

De fato esta função de proteção foi desenvolvida para contornar as limitações enfrentadas pelos tipos de proteção mais comuns e também para atender as necessidades de um sistema de transmissão moderno, em que as linhas de circuito duplo se tornam cada vez mais comuns.

No estado da arte da proteção diferencial, o principal desafio é aumentar a sensibilidade na detecção das faltas internas sem perda de segurança para faltas externas. Para superar dificuldades nesse sentido, diversas soluções têm sido propostas.

No trabalho de Wang *et al.* (2005b), os autores apresentam um elemento diferencial percentual para aumentar a sensibilidade do relé e melhorar o desempenho da proteção diferencial cruzada. A principal motivação para o trabalho foi a necessidade da proteção diferencial tradicional ser ajustada com um alto valor de restrição para linhas de extra alta tensão, o que reduz a sensibilidade do relé, principalmente para situações de elevado carregamento. O principal efeito do ajuste da proteção com alto valor de restrição é que mais faltas serão eliminadas no modo de operação sucessivo. Esse modo de operação ocorre tipicamente para faltas localizadas

em uma região próxima ao terminal remoto ao terminal de instalação do relé em análise, o que resulta em atrasos na eliminação do defeito. De fato, pode acontecer do relé local não detectar o defeito instantaneamente, só conseguindo ser sensibilizado após a abertura do disjuntor remoto, retardando-se o tempo de atuação da proteção. Ressalta-se que, por meio do uso de um elemento cruzado, também conhecido como elemento de proteção transversal diferencial, baseado no valor da amplitude da corrente diferencial, os autores demonstram ser possível identificar se a falta é interna ou externa à região protegida. Além disso, lógicas de seleção de fases e de elementos de bloqueio são utilizadas para bloquear a atuação indevida do relé nas situações em que o mesmo atua em modo de operação sucessivo. Nesses casos, a corrente da fase defeituosa cai a zero, enquanto que a corrente da linha sã corresponderá à corrente de carregamento. Com isso, o elemento diferencial transversal percentual é bloqueado, impedindo que a diferença entre a corrente das duas linhas promova o trip indevido do relé.

Em Wang *et al.* (2005c), os autores apresentam um trabalho com a mesma lógica de proteção e com os mesmos elementos adicionais associados à proteção diferencial cruzada do trabalho Wang *et al.* (2005b). No entanto, Wang *et al.* (2005c) apresentam o relé, formado pelos elementos diferencial percentual, seletores de fase e elementos de bloqueio, com maiores detalhes de implementação, analisando e descrevendo os mapas lógicos de atuação da proteção. Ambos os trabalhos demonstram que o elemento diferencial percentual faz com que o relé atue corretamente em situações de carregamento consideravelmente alto, melhorando a sensibilidade da proteção diferencial cruzada tradicional, aumentando a área de atuação da proteção em modo instantâneo e aumentando a estabilidade para faltas externas. A implementação completa do relé, incluindo os elementos adicionais associados à proteção diferencial cruzada, permite a atuação da proteção em qualquer ponto da linha protegida nos modos de operação instantâneo ou sucessivo e não requer a necessidade de um canal de comunicação entre os terminais da linha.

Em Wang *et al.* (2005a) também é apresentado um elemento diferencial percentual para melhorar a sensibilidade da proteção cruzada. No entanto, o desempenho da proteção é afetado tanto por correntes de carga quanto por situações em que as fontes conectadas aos terminais resultam em valores de SIR (*Source Impedance Ratio*) consideravelmente diferentes entre si, ou seja, existe uma fonte fraca e uma outra forte. Mesmo na ocorrência de uma falta interna, as amplitudes das correntes que circulam em ambas as linhas do circuito duplo no terminal

conectado à fonte com alto valor de SIR, também chamada de fonte fraca, possuem valores semelhantes. Desta forma, a proteção pode não identificar o defeito e não atuar para eliminar a falta em situações nas quais as contribuições de curto-circuito se confundem com as correntes de carga. Para tentar contornar este problema, o trabalho propõe o método das correntes incrementais (*Supper-Imposed Currents*, em inglês) para aumentar a sensibilidade do relé diferencial cruzado, principalmente do relé conectado ao terminal que contém a fonte fraca. Resumidamente, o método consiste na subtração entre os valores medidos das correntes após a ocorrência do defeito e as correntes medidas antes da falta, fazendo com que o relé obtenha apenas correntes de falta pura. Simularam-se no trabalho diversas situações de falta aliadas a variações nas características das fontes por meio de um sistema de circuito duplo simplificado. Os resultados demonstram que o método das correntes incrementais permite que o relé atue corretamente nos modos de operação instantâneo ou sucessivo, mesmo na presença de uma fonte fraca ligada ao sistema. No entanto, fica evidenciado que mesmo com o método das correntes incrementais, a porcentagem da linha em que a proteção atua em modo instantâneo ainda depende fortemente do seu carregamento e da força das fontes conectadas a ela (GOMES, 2014).

Em Tripathy *et al.* (2014) é proposto um novo algoritmo de proteção para linhas de circuito duplo que possuem um dispositivo controlador unificado de fluxo de potência (em inglês, *Unified Power Flow Controller* ou UPFC) em sua configuração. Este dispositivo UPFC interfere nos sinais de tensão e corrente enviados ao relé de proteção e assim afeta diretamente o desempenho do sistema de proteção desse circuito. O trabalho apresenta um algoritmo de proteção para linhas de circuito duplo compensadas com um dispositivo UPFC, baseado na proteção diferencial cruzada em conjunto com uma ferramenta matemática, cujo nome é transformada S discreta rápida (*Fast Discrete S-Transform*, FDST). A FDST usa técnicas de seleção de frequência adaptadas aos sinais de sistema de potência de forma a reduzir significativamente a complexidade computacional demandada. Desta forma, as correntes de fase de ambas as linhas do circuito duplo e medidas em um mesmo terminal passam por um dispositivo detector de faltas, onde o circuito em que ocorreu a falta é identificado por meio da lógica da proteção diferencial cruzada. Posteriormente, o sistema baseado nas técnicas de proteção diferencial cruzada em conjunto com a energia espectral da FDST é utilizado para selecionar as fases defeituosas dentro do circuito já identificado na etapa anterior do algoritmo. Os autores do trabalho apresentam as formulações da FDST, definem os parâmetros das linhas usadas nas simulações e comentam os

resultados obtidos para diferentes tipos de falta, envolvendo variações na resistência de falta, ângulos de incidência de falta e parâmetros do UPFC. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo é capaz de identificar faltas em circuito duplos compensados com dispositivos UPFC. No entanto, o relé opera indevidamente para alguns casos de faltas externas.

Em Sanaye-Pasand & Jafarian (2011), os autores propõem um algoritmo baseado na lógica de diagrama de estados, combinando a proteção diferencial cruzada com a lógica da proteção de distância para ser aplicado em sistemas de circuito duplo. O novo método de proteção diferencial cruzada compara as correntes das mesmas fases do circuito duplo em um plano bidimensional. Este plano bidimensional é dividido em seis áreas com o objetivo de abranger todos os possíveis estados de operação das linhas de circuito duplo. A função de proteção de distância é utilizada para abranger algumas situações específicas de falta em que a proteção diferencial cruzada não é capaz de operar corretamente e também para abranger faltas evolutivas. Além disso, a compensação de sequência zero é realizada com o objetivo de evitar problemas de sobrealcance na proteção de distância, para situações em que um dos circuitos se encontra desenergizado e aterrado em ambos os terminais. O algoritmo baseado em diagrama de estados utiliza a sequência de transições entre as diferentes regiões do plano bidimensional com o objetivo de ajudar o relé a atuar corretamente para diferentes cenários de faltas internas. Os resultados demonstram que o algoritmo de proteção é rápido, principalmente quando ambas as linhas do circuito duplo estão em operação, sendo também capaz de eliminar faltas evolutivas corretamente, apresentando boa confiabilidade. Um ponto negativo do algoritmo é a necessidade de compensação de sequência zero para alguns casos de falta, sendo que a estimação dos parâmetros dessa natureza nem sempre é precisa, o que pode ocasionar erros na atuação do relé de distância.

Os métodos de proteção diferencial cruzada em linhas de circuito duplo procuram aumentar a sensibilidade do relé de proteção para diversos cenários de falta e ao mesmo tempo garantir a confiabilidade e a estabilidade nas diversas situações de falha. Um ponto negativo destes métodos é o atraso de atuação da proteção quando as faltas ocorrem muito próximas ao terminal remoto, requerendo o modo de operação sucessivo. Este atraso de proteção está presente de fato em todos os tipos de proteção que não necessitam de canal de comunicação entre os terminais da linha protegida.

2.3 PROTEÇÃO BASEADA EM OVS EM LINHAS DE CIRCUITO DUPLO

Nos últimos anos, para proteger SEEs com elevado grau de carregamento, funções de proteção têm sido desenvolvidas no sentido de tornar possível operações com tempos da ordem de poucos milissegundos, a exemplo das funções baseadas na teoria de OVs (SCHWEITZER *et al.*, 2016). Esses métodos são complementares aos métodos tradicionais baseados em fasores e têm se mostrado muito promissores no sentido de acelerar a operação da proteção clássica em cenários de faltas mais adversos. Desta forma, esses métodos também têm se mostrado viáveis para aplicações em LTs de circuito duplo, resultando em tempos de atuação de poucos milissegundos.

No trabalho de Sharafi *et al.* (2012) é proposto um algoritmo de proteção para detecção e classificação de faltas em linhas de circuito duplo. O método de proteção proposto é dividido em dois estágios. O primeiro estágio consiste na aplicação da proteção diferencial cruzada para faltas internas mais próximas ao terminal local da LT protegida. Já o segundo estágio, por sua vez, é necessário para detectar faltas próximas ao terminal remoto da LT monitorada, durante as quais a proteção diferencial cruzada só consegue detectar no modo de operação sucessivo. Este segundo estágio é baseado nas OVs induzidas no momento da abertura dos disjuntores remotos. Ao analisar a energia associada a estas OVs, o algoritmo detecta rapidamente a ocorrência de faltas internas ou externas ao circuito duplo, sendo capaz ainda de identificar as fases defeituosas para os casos de faltas internas à LT protegida. O algoritmo proposto pelos autores acelera o tempo de detecção das faltas próximas ao terminal remoto da linha protegida, o que é uma grande vantagem para SEEs com baixa margem de estabilidade. Adicionalmente, o método proposto identifica e detecta faltas inter-circuitos. Os resultados da simulação mostram que o algoritmo proposto no trabalho possui tempos de atuação inferiores ao método de proteção diferencial cruzada tradicional. No entanto, um ponto negativo do método é que para faltas próximas ao terminal remoto, é necessário esperar a abertura dos disjuntores para que sejam geradas OVs que determinarão a forma de operação da proteção, requisito este que resulta em atrasos adicionais na eliminação da falta.

No trabalho de Dong *et al.* (2009) é apresentado um algoritmo para detectar, classificar faltas e selecionar as fases defeituosas em LTs, utilizando a amplitude das primeiras OVs de corrente induzidas por um evento de falta. Os autores investigam as características de vários tipos de

falta tendo como base a transformada de Karrenbauer, que é uma das transformações modais que pode ser utilizada para desacoplar sistemas trifásicos no domínio do tempo (SHARAFI *et al.*, 2011). Ao analisar a característica dos vários tipos de falta, os autores chegam a um algoritmo de seleção de fases que depende de uma série de condições de segurança e ajustes para promover o *trip* correto dos relés de proteção. O trabalho utiliza a transformada *Wavelet* para extrair as OVs dos sinais de corrente pós-falta. Várias simulações foram realizadas com o objetivo de validar o método, as quais incluem faltas internas bem próximas ao terminal local, faltas internas com diferentes valores de resistência de falta e também faltas internas com diferentes ângulos de incidência. Os resultados demonstram que o algoritmo identifica as fases defeituosas com precisão para a maioria dos casos desde que o ângulo de incidência não fique muito próximo de zero. Desvantagens do método incluem: requerer uma série de condições de segurança e limiares de operação o que pode ocasionar maiores possibilidades de erros e não englobar a possibilidade de faltas inter-circuitos.

No trabalho de Sharafi *et al.* (2011) é apresentado um método de proteção para linhas de circuito duplo baseado em OVs de corrente. O algoritmo se baseia nas primeiras OVs induzidas pela ocorrência de uma falta, as quais serão detectadas pelo relé no terminal local da linha de transmissão protegida. Quando uma falta interna ocorre em qualquer uma das linhas do circuito duplo, as OVs de correntes das mesmas fases vão apresentar amplitudes diferentes. Por outro lado quando uma falta externa ao circuito duplo acontece, as OVs detectadas vão apresentar amplitudes próximas. Estas peculiaridades são utilizadas, no algoritmo, para distinguir a ocorrência de uma falta interna de uma externa ao elemento protegido. Os autores também apresentam um algoritmo para classificar o tipo de falta e selecionar as fases defeituosas das linhas de circuito duplo. O algoritmo proposto se baseia somente nas primeiras OVs de corrente e permite *trips* da ordem de poucos milissegundos. Além disso o método identifica faltas inter-circuitos, em que o defeito ocorre nas fases de ambos os circuitos paralelos. O algoritmo é validado por diversas simulações, que incluem faltas internas bem próximas ao terminal local, faltas internas com altos valores de resistência de falta, faltas inter-circuitos, faltas internas com ângulos de incidência próximos de zero e faltas externas. Os resultados demonstram que o algoritmo é confiável e atua rapidamente para diversos cenários de falta, porém a necessidade de definição de vários limiares de operação e de margens de segurança configuram uma desvantagem no algoritmo.

No trabalho de Zhang *et al.* (2017) é proposto um método de proteção para linhas de circuito duplo baseado em OVs, o qual utiliza dados de apenas um único terminal. Este método foi desenvolvido para operar em paralelo com os métodos fasoriais tradicionais, permitindo acelerar os tempos de *trip* para vários cenários de falta. Comparado a outros métodos baseados também em OVs, este método faz uso das OVs no terminal local, as quais são medidas tanto na LT com falta quanto na LT sã, superando a necessidade de canais de comunicação e sincronização de dados das medições no terminal local e remoto. Além disso, o método possui outras vantagens: detecção rápida de faltas, sem zonas mortas de proteção para faltas próximas aos terminais monitorados e seletividade para LTs com derivação. Em suma, o método proposto pelos autores faz uso das chamadas OVs dominantes em um evento de falta. Elas são aquelas induzidas pela ocorrência de um defeito e se propagam do ponto de ocorrência da falta até o terminal monitorado. A detecção destas OVs dominantes é feita através da análise das amplitudes e das polaridades relativas às OVs detectadas na LT com falta e na LT sã. Uma vez que OVs dominantes foram detectadas pela proteção em ambas as LTs, os autores implementam um conjunto de rotinas que permitem confirmar a ocorrência de falta interna ao circuito duplo com o objetivo de não confundir com descargas atmosféricas ou operações de disjuntores, os quais são situações que também lançam OVs no SEE. Os resultados de simulação demonstram que o método é bastante promissor, permitindo acelerar os tempos de *trip* para as faltas mais comuns em SEEs. No entanto, o método não apresenta métodos de detectar faltas inter-circuitos, sendo esta uma desvantagem.

Por fim, faz-se oportuno mencionar que os métodos de proteção baseados em OVs se mostram de fato promissores do ponto de vista de tempos de atuação, embora também apresentam algumas limitações e desafios. Uma destas limitações é que as funções podem não atuar corretamente em casos de faltas no momento da passagem da tensão por zero. De fato, um ângulo de incidência próximo da passagem da tensão por zero pode fazer a falta não ser detectada pelo relé. Outra limitação consiste na necessidade de altas taxas de amostragem para análise dos sinais transitórios de tensão e corrente da LT, embora o avanço da tecnologia venha permitindo contornar esta dificuldade. Estas limitações, de fato, estão presentes em todos os métodos baseados em OVs e podem comprometer o desempenho da proteção, muito embora não sejam atualmente tratados como fatores limitantes decisivos capazes de inviabilizar a utilização dessas técnicas (SCHWEITZER *et al.*, 2016).

FUNDAMENTOS SOBRE ONDAS VIAJANTES

Neste capítulo, serão apresentadas as fundamentações teóricas sobre OV's nas LTs. Para tanto, é necessário o entendimento do comportamento das OV's em sistemas de transmissão. As OV's são induzidas por eventos em SEEs que resultam na mudança abrupta do ponto de operação da rede elétrica, como em casos de faltas, descargas atmosféricas, chaveamento de disjuntores e cargas no sistema, entre outros (DING *et al.*, 2017). O algoritmo apresentado em Zhang *et al.* (2017) permite distinguir a ocorrência de faltas de outros eventos nos SEEs, os quais também lançam OV's nos sistemas de potência. No entanto, esta dissertação, por ser um estudo preliminar, somente avaliará distúrbios ocasionados por faltas em SEEs.

A análise das OV's apresentada neste capítulo contemplam o equacionamento básico do modelo de LTs a parâmetros distribuídos, destacando a utilidade deste modelo na análise de OV's. Posteriormente, são abordadas as equações de propagação de ondas em descontinuidades para LTs de circuito duplo em um cenário de falta, detalhando as particularidades das OV's quando da ocorrência da falha.

3.1 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Sabe-se que os sistemas de proteção existem para tornar o suprimento de energia o mais confiável e seguro possível para os usuários. Dispositivos de proteção adequados devem ser instalados junto aos equipamentos elétricos com o objetivo de resguardá-los de danos materiais provenientes de defeitos. Espera-se que um sistema de proteção operando corretamente possua as seguintes características: detecção de defeitos sem atrasos adicionais, isolamento da parte afetada com o mínimo de desligamentos, sensibilidade aos menores indicadores de problemas e, ao mesmo tempo, segurança para não atuar de forma indevida.

Tendo em mente as características necessárias aos sistemas de proteção, lista-se a seguir a

nomenclatura usada para se referir a algumas das características já mencionadas, bem como outros requisitos básicos de um sistema de proteção (ANDERSON, 1999):

- *Sensibilidade*: capacidade de identificar as faltas para as quais foi projetado.
- *Confiabilidade*: é definida como a probabilidade do funcionamento correto da proteção quando houver a necessidade de sua atuação. O sistema de proteção deve atuar adequadamente para um defeito localizado dentro de sua zona de proteção e restringir sua operação para uma falta localizada fora de sua zona de proteção.
- *Segurança*: é uma expressão usada para se referir à habilidade de um sistema de proteção de evitar a atuação indevida.
- *Seletividade*: é uma expressão que se refere à habilidade de prover a máxima continuidade do serviço com um mínimo de desconexões necessárias para isolar a falta, ou seja, só os elementos em falta devem ser retirados do SEE, ao passo que os demais elementos devem permanecer conectados ao SEE.
- *Coordenação*: determina os ajustes apropriados entre os dispositivos que protegem um determinado elemento com o objetivo de prover seletividade durante a operação.
- *Velocidade*: refere-se à capacidade de atuar rapidamente, de maneira a reduzir o tempo de duração das faltas, minimizando os danos ao sistema protegido.
- *Simplicidade*: utilização mínima de equipamentos, dispositivos e circuitos para efetuar a proteção do SEE.

Nos últimos anos, a conectividade entre diferentes SEEs tem aumentado (MME/EPE, 2017), tornando as redes de transmissão cada vez mais complexas e operando cada vez mais próximas dos limites de estabilidade. De fato, os engenheiros de sistema de potência estão cada vez mais preocupados com os limites de estabilidade dos SEEs e por conta disto métodos de detecção de faltas mais rápidos têm sido necessários para garantir a estabilidade transitória dos sistemas de potência (DESHPANDE; SHAH, 2011). Neste cenário, os métodos baseados em OV's se destacam, pois permitem a obtenção de tempos de detecção de faltas muito rápidos, os quais são limitados apenas pela velocidade de propagação das OV's nas LTs (BOLLEN, 1993). Funções baseadas em OV's possibilitam, de fato, atuações ultra-rápidas do sistema de proteção sem abrir mão da confiabilidade e da seletividade (SHARAFI *et al.*, 2011; DONG *et al.*, 2009).

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA LT

Todos os condutores que compõem as LTs possuem resistências, indutâncias e capacitâncias distribuídas ao longo do seu comprimento. No entanto, na maior parte das aplicações práticas, pode-se considerar que as resistências e as indutâncias estão concentradas e, portanto, podem ser substituídas por um valor único, sendo este o modelo de LTs a parâmetros concentrados. Esta simplificação é igualmente aplicável para os parâmetros de condutância e capacitância dos condutores da LT.

As LTs não podem ser analisadas com base no modelo de parâmetros concentrados, quando o comprimento da linha é da ordem de $\frac{1}{10}$ do comprimento de onda do sinal aplicado à LT (SIDHU, 2004). Neste caso, as LTs devem ser modeladas a parâmetros distribuídos, visando representar o fenômeno de propagação de OV. Linhas com comprimentos significativos nas quais a propagação de ondas é perceptível apresentam as seguintes características: 1) OV de corrente e de tensão se propagam ao longo da LT, cujas polaridades medidas dependem das polaridades adotadas nos transformadores de potencial e corrente; 2) A velocidade de propagação das OV é elevada, porém é finita, de modo que em linhas aéreas, o modo aéreo tende a ter velocidade de propagação próximo à velocidade da luz (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Essas características serão consideradas posteriormente durante o desenvolvimento do algoritmo de proteção proposto.

3.2.1 OVs em LTs com Perdas

É evidente que a maioria das LTs utilizadas na prática é constituída por multi-condutores e apresentam perdas tanto nos seus condutores quanto nos seus isoladores. No entanto, por questões de simplificação, será utilizado um modelo simplificado, o qual consiste no modelo monofásico de LT, conforme representado na Figura 3.1 (METELLO, 2012). A figura consiste de uma pequena seção de comprimento Δx da LT em análise, na qual estão representados os parâmetros de resistência, indutância, capacitância e condutância por unidade de comprimento, os quais são representados por R, L, C e G, respectivamente. Nesse exemplo, considera-se que estes parâmetros da LT permanecem constantes e não variam com o tempo.

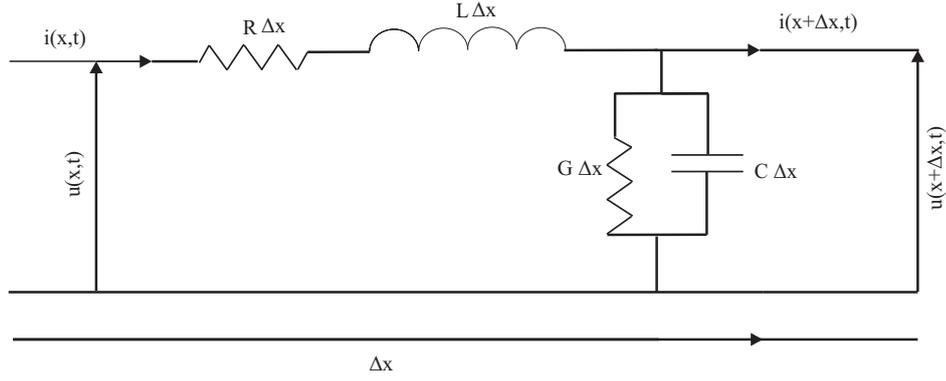


Figura 3.1. Elemento infinitesimal da LT com perdas.

Por conta do modelo de parâmetros distribuídos, os valores de tensão e corrente variam ao longo do comprimento da LT analisada e ao longo do tempo, simultaneamente Sidhu (2004). Assim, as equações da LT podem ser derivadas aplicando-se as leis de Kirchhoff no circuito da Figura 3.1, obtendo-se:

$$u(x, t) - u(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot u(x, t) + C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (3.2)$$

Dividindo (3.1), e (3.2) por Δx e fazendo com que o limite de Δx tenda a zero o resultado será:

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = R \cdot i(x, t) + L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.3)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = G \cdot u(x, t) + C \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}, \quad (3.4)$$

em que $u(x, t)$ e $i(x, t)$ são os sinais de tensão e corrente no instante t e na posição x .

Aplicando-se a transformada de Laplace, (3.3) e (3.4) se tornam:

$$-\frac{\partial U(x, s)}{\partial x} = (R + s \cdot L) \cdot I(x, s), \quad (3.5)$$

$$-\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = (G + s \cdot C) \cdot U(x, s), \quad (3.6)$$

em que $U(x, s)$ e $I(x, s)$ são, respectivamente, as transformadas de Laplace de $u(x, t)$ e $i(x, t)$.

A partir das equações da LT, chega-se às equações de onda, dadas por:

$$\frac{\partial^2 U(x, s)}{\partial x^2} = \gamma^2(s) \cdot U(x, s), \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = \gamma^2(s) \cdot I(x, s), \quad (3.8)$$

na qual a constante de propagação da LT $\gamma(s)$ é definida como:

$$\gamma(s) = \sqrt{(R + s \cdot L) \cdot (G + s \cdot C)} \quad (3.9)$$

A solução geral para as equações (3.7) e (3.8) resulta em:

$$U(x, s) = U^+(s) \cdot e^{-\gamma x} + U^-(s) \cdot e^{\gamma x}, \quad (3.10)$$

$$I(x, s) = I^+(s) \cdot e^{-\gamma x} + I^-(s) \cdot e^{\gamma x}, \quad (3.11)$$

na qual $U^+(s)$, $U^-(s)$, $I^+(s)$ e $I^-(s)$ são constantes, em geral, funções de s apenas, que podem ser avaliadas como condições de contorno nas extremidades da LT (METELLO, 2012). Os subscritos $+$ e $-$ indicam a direção das ondas, que são positivas ou negativas em relação à x para uma única referência de direção de propagação.

A partir da solução geral apresentada, tem-se de acordo com França (2017) que:

$$\frac{U^+(s)}{I^+(s)} = \frac{U^-(s)}{I^-(s)} = Z_c, \quad (3.12)$$

em que Z_c é a impedância característica da LT, dada por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + s \cdot L}{G + s \cdot C}}. \quad (3.13)$$

Dessa forma, (3.11) pode ser reescrita em função de $U(x, s)$ e de Z_c da seguinte forma:

$$I(x, s) = \frac{U^+(s)}{Z_c} \cdot e^{-\gamma x} + \frac{U^-(s)}{Z_c} \cdot e^{\gamma x}, \quad (3.14)$$

As soluções gerais para equações de ondas, dadas por (3.10) e (3.14), podem ser interpretadas como OV's de tensão e corrente que se propagam ao longo da LT em ambas as direções (x positivo e negativo) e que sofrem atenuação ao longo do comprimento da LT (METELLO, 2012).

3.2.2 OV's em LTs sem Perdas

O circuito com a LT sem perdas é apresentado na Figura 3.2, cuja única diferença com relação ao circuito da Figura 3.1 é o fato do circuito desconsiderar os parâmetros R e G .

Desta forma, (3.3) e (3.4) passam a ser:

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.15)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (3.16)$$

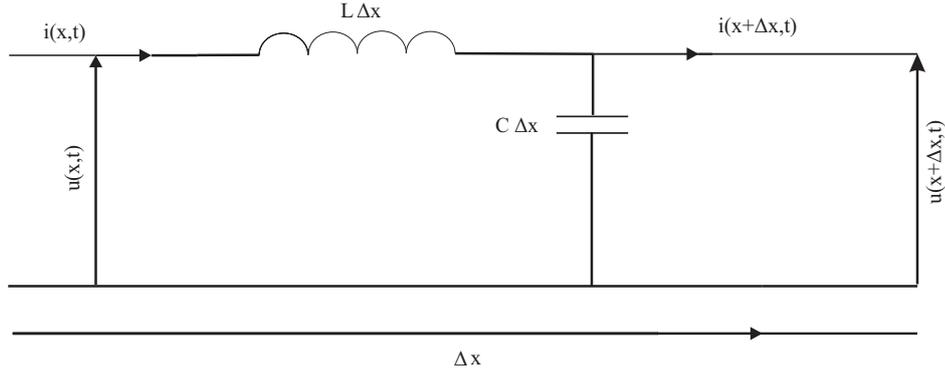


Figura 3.2. Elemento infinitesimal da LT sem perdas.

Aplicando-se a transformada de Laplace, (3.15) e (3.16) se tornam:

$$-\frac{\partial U(x, s)}{\partial x} = (s \cdot L) \cdot I(x, s), \quad (3.17)$$

$$-\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = (s \cdot C) \cdot U(x, s). \quad (3.18)$$

A partir de (3.17) e (3.18), obtém-se que:

$$\frac{\partial^2 U(x, s)}{\partial x^2} = s^2 \cdot L \cdot C \cdot U(x, s), \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = s^2 \cdot L \cdot C \cdot I(x, s). \quad (3.20)$$

Por fim, chega-se à solução geral para as equações (3.19) e (3.20):

$$U(x, s) = U^+(s) \cdot e^{-\frac{s \cdot x}{v}} + U^-(s) \cdot e^{-\frac{s \cdot x}{v}}, \quad (3.21)$$

$$I(x, s) = \frac{U^+(s)}{Z_s} \cdot e^{-\frac{s \cdot x}{v}} + \frac{U^-(s)}{Z_s} \cdot e^{-\frac{s \cdot x}{v}}, \quad (3.22)$$

em que v é a velocidade de propagação das OVs e Z_s é a impedância de surto da LT, dadas por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (3.23)$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3.24)$$

As equações (3.21) e (3.22) representam OVs de tensão e corrente, respectivamente, as quais se propagam na LT em ambas as direções com uma velocidade v . O valor de v é importante, pois através dele e do valor do comprimento da linha pode-se determinar o tempo de trânsito da LT e assim estimar a ordem de grandeza do tempo de propagação de frentes de onda que são

avaliadas nos esquemas de proteção baseados em OVs. Outro dado importante é a impedância Z_s , através da qual é possível calcular os coeficientes de reflexão e refração nas LTs, e com isso estimar as amplitudes das OVs medidas pelo relé, as quais serão importantes para determinação de limiares de detecção de falta e dos respectivos ajustes da proteção (SHARAFI *et al.*, 2011).

3.3 FERRAMENTAS MATEMÁTICAS PARA A OBTENÇÃO DAS OVS

Com o objetivo de extrair as OVs induzidas por eventos de falta, faz-se necessária a utilização de ferramentas matemáticas apropriadas, as quais serão aplicadas aos sinais de tensão e corrente medidos pelos Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) e pelos Transformadores de Corrente (TCs) em LTs, respectivamente. Na literatura, diversas técnicas têm sido propostas no sentido de viabilizar a correta detecção de frentes de onda induzidas por falta, garantindo precisão nos instantes de chegada das OVs aos terminais monitorados.

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) é uma ferramenta matemática que permite obter informações de frequência de um sinal, sendo perdidas informações de tempo. Desta maneira, a TDF se aplica bem à análise de sinais, cujas componentes de frequência são invariantes no tempo. A análise clássica de Fourier, porém, não é indicada na análise de sinais para a detecção de distúrbios transitórios em SEEs, como é o caso das OVs induzidas nas LTs (COSTA *et al.*, 2015).

A Transformada Rápida de Fourier (TRF), que é a versão com janela da TDF, supera algumas limitações da TDF ao fornecer informações de tempo e frequência, sendo apropriada à análise de harmônicos (GU; BOLLEN, 2000). A largura da janela pode ser deslocada e ajustada, apropriadamente, para se analisar determinada faixa de frequência de um sinal. Ao se fazer a escolha apropriada do tamanho da janela, a TRF pode ser usada na análise de transitórios em SEEs. No entanto, uma limitação da TRF na análise de sinais com transitórios é a escolha da largura da janela, a qual determina a resolução no tempo e a resolução de frequência do sinal analisado (COSTA *et al.*, 2015). Desta maneira, se o tamanho da janela for escolhida para ter uma boa resolução no tempo, então sua resolução na frequência se torna deteriorada, ou vice-versa.

Nos SEEs, sabe-se que as tensões e correntes medidas durante distúrbios transitórios apre-

sentam componentes de frequência diversas. De maneira geral, a maioria dos componentes de baixa frequência possuem uma duração longa, ao passo que os componentes de alta frequência possuem uma duração curta. Neste sentido, uma análise do sinal em um plano de múltiplas escalas é necessária, no qual a largura da janela de tempo e a banda de frequência não sejam constantes, mas sim variantes. Assim, haveria janelas mais longas para os fenômenos de baixa frequência e janelas mais curtas, melhor adaptadas para componentes de alta frequência, permitindo uma maior flexibilidade para a análise. Para alcançar tais características, a Transformada Wavelet Discreta (TWD) vem sendo utilizada como ferramenta de suporte à análise de transitórios de alta frequência em SEEs, sendo uma técnica que supera as limitações das transformadas de Fourier. A TWD faz uso da análise multirresolução (AMR), a qual permite a decomposição de um sinal em diferentes níveis de resolução de tempo e de frequência, sendo esta uma ferramenta apropriada à detecção e localização de transitórios com componentes de baixa e alta frequência, situação muito comum em sinais com falta (WILKINSON; COX, 1996).

No trabalho de Mallat (1989), é desenvolvido o conceito matemático da AMR, permitindo o cálculo da TWD através de um algoritmo recursivo chamado piramidal. A TWD pode ser calculada de forma rápida por meio deste algoritmo, porém esta transformada se torna variante no tempo, por conta da subamostragem por dois empregada às amostras do sinal. Como consequência, podem ocorrer distorções na reconstrução do sinal, fato este que pode inviabilizar seu uso em determinadas aplicações (METELLO, 2012). Por exemplo, a TWD não é indicada para ser utilizada na detecção de OVs para a localização de falta, já que a detecção deve ser feita o mais rápido possível e o processo de subamostragem por dois compromete o desempenho da TWD (COSTA *et al.*, 2015). Para contornar estas limitações, a Transformada Wavelet Discreta Redundante (TWDR) deve ser utilizada. De fato, a TWDR é invariante no tempo, pois não realiza a subamostragem por dois. Ademais, a TWDR pode ser aplicada a qualquer número de amostras, ao contrário da TWD que requer que o número de amostras seja uma potência de dois. As modelagens matemáticas das Transformadas Wavelet, as quais incluem a TWD e a TWDR, são discutidas em maiores detalhes em Costa *et al.* (2015) e METELLO (2012).

Nesta dissertação, com o objetivo de extrair as informações das OVs dos sinais de corrente de fase medidos pelos TCs (os quais são imunes aos efeitos da saturação e cujas prováveis fontes de

erros não afetam o desempenho do algoritmo) de ambos os circuitos da LT de circuito duplo no terminal monitorado, utilizou-se o filtro *Differentiator-Smoother* (filtro DS) (SCHWEITZER *et al.*, 2014; SCHWEITZER *et al.*, 2016). As expressões matemáticas do filtro DS que serão utilizadas para extrair as OVs a partir dos sinais de corrente de fase i_a , i_b e i_c são dadas por:

$$TW_a(n) = - \sum_{q=n-N_{DS}}^{n-\frac{N_{DS}}{2}} G \cdot i_a(q) + \sum_{q=n-\frac{N_{DS}}{2}+1}^n G \cdot i_a(q), \quad (3.25)$$

$$TW_b(n) = - \sum_{q=n-N_{DS}}^{n-\frac{N_{DS}}{2}} G \cdot i_b(q) + \sum_{q=n-\frac{N_{DS}}{2}+1}^n G \cdot i_b(q), \quad (3.26)$$

$$TW_c(n) = - \sum_{q=n-N_{DS}}^{n-\frac{N_{DS}}{2}} G \cdot i_c(q) + \sum_{q=n-\frac{N_{DS}}{2}+1}^n G \cdot i_c(q), \quad (3.27)$$

onde G é o valor do ganho do filtro ajustado com o objetivo de se obter um ganho unitário na saída do filtro DS e seu valor é $\frac{2}{N_{DS}}$ (MAGALHAES *et al.*, 2017), n é o número da amostra do sinal considerado, N_{DS} corresponde ao número total de coeficientes do filtro DS, ao passo que TW_a , TW_b e TW_c são os sinais filtrados, usados na análise de OVs nas fases a, b e c, respectivamente.

O valor de N_{DS} é calculado considerando que a janela de coeficientes do filtro DS é igual a 20 μs e que a frequência de amostragem típica aplicada aos sinais de corrente para a detecção de OVs é da ordem de 1 MHz, conforme reportado em SEL (2017). Assim, em aplicações reais, o valor de N_{DS} tem correspondido a um valor de 20 amostras tipicamente. Maiores detalhes do filtro DS e os ajustes considerados serão abordados no capítulo 4 desta dissertação, onde o algoritmo de proteção será abordado também em maiores detalhes.

O filtro DS já vem sendo utilizado em relés digitais, como é o caso do relé SEL T400L (SEL, 2017). Uma característica deste filtro é que na sua saída são obtidas ondas triangulares em resposta a variações na forma de degraus nos sinais de entrada, forma esta de saída que facilita a identificação dos instantes de incidência das OVs de interesse bem como a análise de suas amplitudes. Este filtro, ao detectar degraus no sinal monitorado, não requer a identificação de transitórios de alta frequência, facilitando o processo de análise de OVs durante faltas em LTs. Na Figura 3.3, a saída do filtro DS é representada em resposta a uma entrada em degrau do sinal de corrente amostrada a uma frequência de 1 MHz.

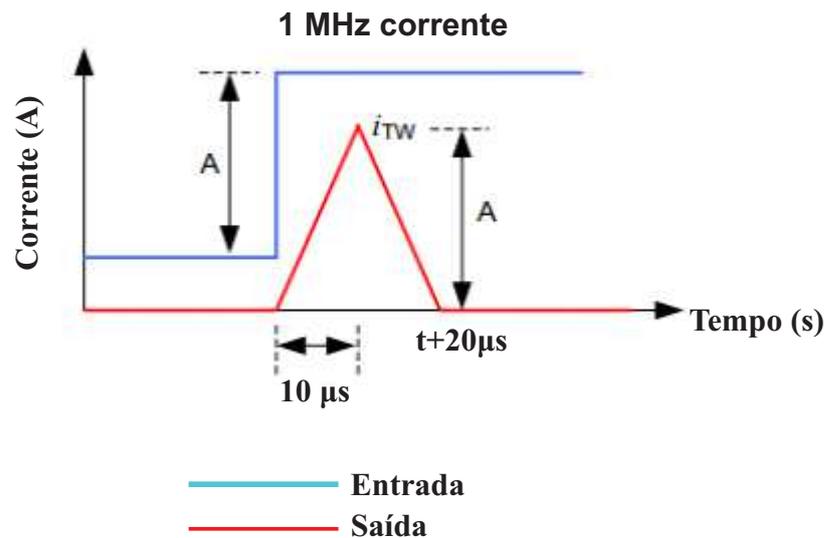


Figura 3.3. Resposta do filtro DS a uma variação em degrau na entrada (SCHWEITZER *et al.*, 2016).

Outra característica importante do filtro DS é que, para o caso de ondas que sofrem atenuação, transitórios na forma de rampa passarão a ser vistos no sinal de entrada ao invés de sinais na forma de degraus, de modo que as saídas passarão a ter formato parabólico. Na Figura 3.4, podem ser vistas as respostas do filtro para várias entradas de sinais de corrente (medidos em Amperes) na forma de rampa em uma escala de tempo da ordem de dezenas de μ s.

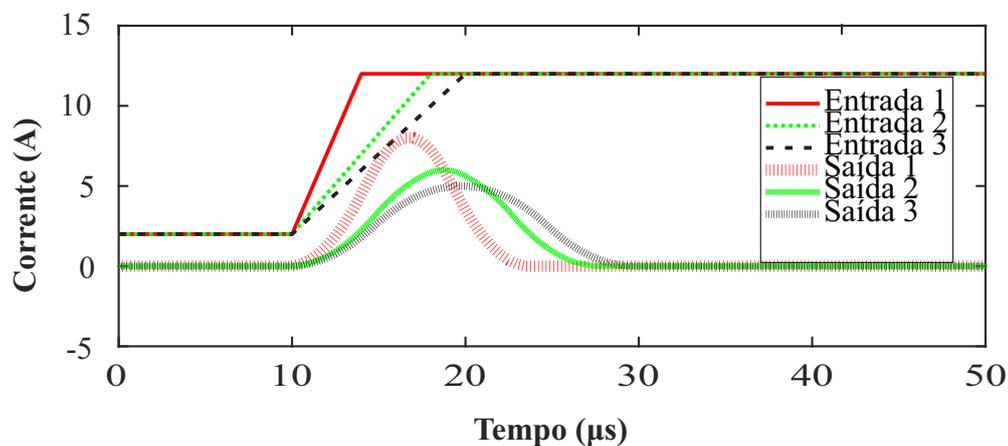


Figura 3.4. Respostas do filtro DS a variações em rampa na entrada.

Neste trabalho, visando realizar implementações condizentes com aplicações já em operação no mundo real, escolheu-se utilizar o filtro DS no processo de filtragem para análise de OVs. Além disso, somente sinais de corrente medidos pelos TCs são aplicados à entrada do filtro DS, ignorando os sinais de tensão medidos pelos TPCs. Esta escolha se deve ao fato de que os sinais de tensão medidos pelos TPCs sofrem atenuação para sinais de altas frequências,

possuindo uma largura de banda limitada para componentes transitórios de alta frequência e desta forma restringindo sua aplicabilidade na detecção de OVs em LT (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Os sinais de corrente medidos pelos TCs, por outro lado, apresentam boa resposta em frequência para uma grande gama de frequências e desta forma, os sinais de corrente são os mais indicados para extrair informações de amplitudes de OVs.

3.4 PROPAGAÇÃO DE OVS EM DESCONTINUIDADES DE LTS DE CIRCUITO DUPLO

Apesar de parecer uma tecnologia recente, algoritmos baseados na teoria de OVs têm sido reportados desde 1931 na literatura (GALE *et al.*, 1993). Uma das limitações para implementação prática destes algoritmos era a necessidade de altas taxas de amostragem, o que atualmente não é mais barreira para tal implementação. De fato, o progresso da tecnologia dos conversores analógico-digital (A/D) e processadores de sinais de alta velocidade e alto desempenho, aliado ao conhecimento adquirido sobre métodos de localização de faltas baseados em OVs têm possibilitado o desenvolvimento de funções de proteção baseadas em OVs no mundo real, culminando no uso cada vez maior de dispositivos baseados na análise de transitórios de faltas seja para fins de proteção ou localização de faltas em sistemas de transmissão (SCHWEITZER *et al.*, 2016; SOUZA, 2007).

De acordo com Gale *et al.* (1993), os métodos de localização de faltas baseados na teoria de OVs podem ser classificados em métodos de um terminal ou de dois terminais. Métodos de um terminal não necessitam de sincronização de dados, porém são mais susceptíveis a erros, uma vez que dependem normalmente da detecção de OVs refletidas no ponto de falta, as quais em alguns casos, podem ser confundidas com ondas refletidas ou refratadas em outros pontos do SEE. Já os métodos de dois terminais necessitam de sincronização de dados, porém não precisam da detecção de OVs refletidas, analisando apenas as primeiras OVs incidentes nos terminais da LT.

Nesta dissertação, o método de proteção a ser implementado, por ser aplicado em LTS de circuito duplo, considera análises em apenas um terminal, de modo que não necessita de sincronização de dados. Além disso, o algoritmo implementado não requer obrigatoriamente o uso

de um canal de comunicação, sendo esta uma característica marcante da proteção diferencial cruzada. Embora não seja necessário, o acréscimo do canal de comunicação melhora o desempenho do método de proteção diferencial cruzada, sobretudo quando uma das LTS estiver fora de operação e a proteção diferencial longitudinal precisar ser implementada. No entanto, o algoritmo a ser implementado não fará uso de canais de comunicação, sendo esta uma opção técnica e economicamente mais viável desde que ambos os circuitos estejam em operação.

No algoritmo proposto, apenas as primeiras OV's incidentes no terminal monitorado são avaliadas, desta forma as eventuais reflexões que possam ocorrer ao longo do sistema monitorado são ignoradas pelo método de proteção, sendo esta uma grande vantagem do algoritmo, que reduz significativamente a possibilidade de erros na detecção de faltas. Isto é possível, pois as eventuais OV's refletidas provenientes de outros pontos do sistema analisado sempre chegam no terminal monitorado depois das primeiras OV's incidentes provenientes do ponto onde a falta ocorreu, assim o algoritmo detecta primeiramente estes primeiros sinais transitórios e bloqueia a detecção de outros sinais que chegam posteriormente, os quais não serão considerados no algoritmo.

Quando uma falta ocorre em uma LT, a mudança abrupta do ponto de operação da rede elétrica induz o aparecimento de OV's nos SEEs. Estas OV's são transmitidas para ambos os lados da LT e atingem os terminais monitorados após tempos de trânsito que dependem do comprimento dos trechos percorridos pelas frentes de onda. Conforme reportado em Sharafi *et al.* (2011), tomando um curto-circuito trifásico como referência, após a ocorrência de uma falta em uma LT, a amplitude inicial das OV's de corrente i_f lançadas no sistema pode ser calculada por:

$$i_f = \frac{V_f}{Z_s + 2R_f}, \quad (3.28)$$

na qual V_f é a tensão de fase no ponto de falta no momento de ocorrência do distúrbio, Z_s é a impedância de surto da LT e R_f é a resistência de falta.

Tendo em vista o objetivo de melhor ilustrar o entendimento da propagação das frentes de onda avaliadas pelo algoritmo proposto, as OV's lançadas em uma LT de circuito duplo durante faltas internas e externas são ilustradas nas Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente. Nota-se que as OV's induzidas pela falta se propagam na linha até encontrar uma descontinuidade no sistema, a qual consiste em um ponto de conexão de elementos com impedâncias diferentes da impedância

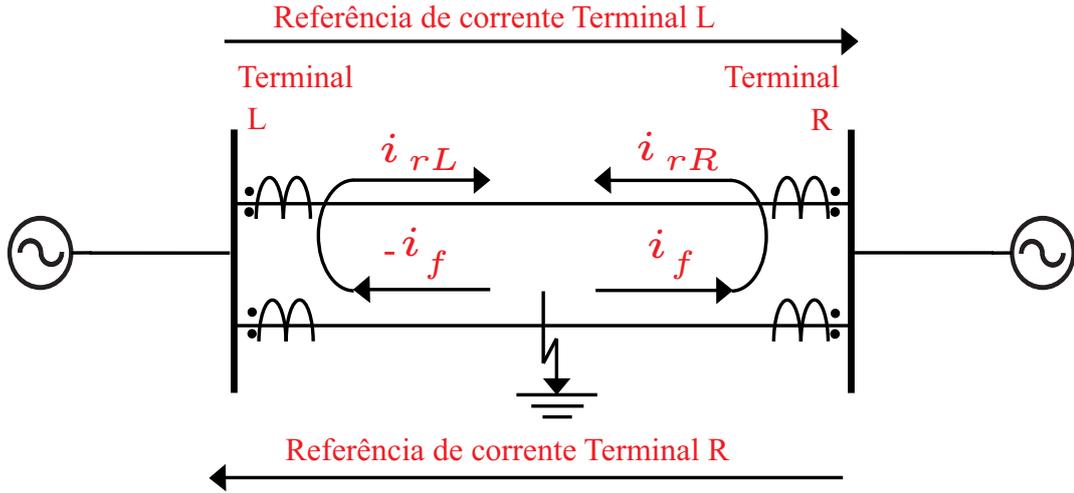


Figura 3.5. Ondas viajantes em linhas de circuito duplo - falta interna.

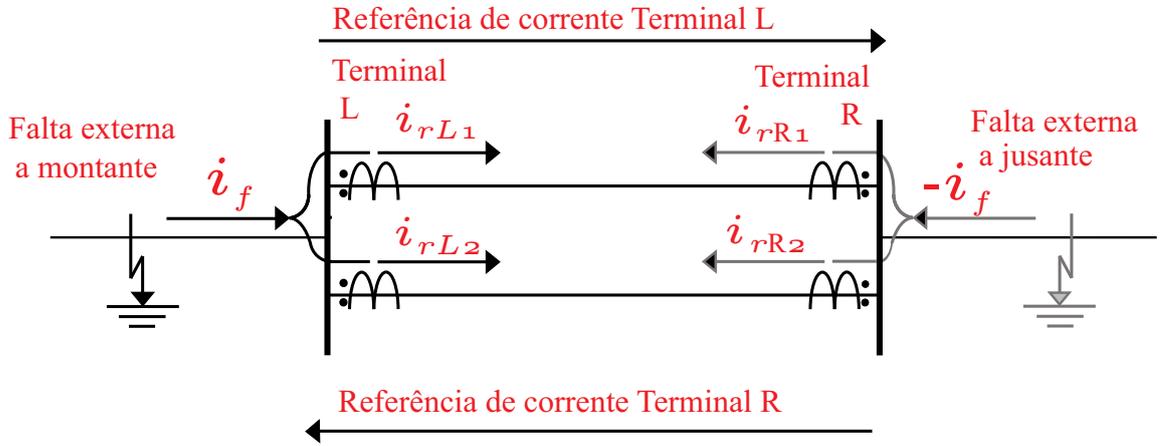


Figura 3.6. Ondas viajantes em linhas de circuito duplo - falta externa.

de surto da LT com distúrbio. Assim, em uma descontinuidade, parte da OV que incide é refletida e a outra parte é refratada para circuitos adjacentes. Nas Figuras 3.5 e 3.6, as ondas refratadas na barra monitorada são representadas por i_{rL} , no caso de falta interna, e por i_{rL1} e i_{rL2} , no caso de falta externa. As amplitudes e polaridades dessas OV's são determinadas pelos coeficientes de reflexão ρ e refração α nos terminais da LT:

$$\rho = -\frac{Z_{eq} - Z_s}{Z_{eq} + Z_s}, \quad (3.29)$$

$$\alpha = \frac{2Z_s}{Z_{eq} + Z_s}, \quad (3.30)$$

onde Z_{eq} é a impedância equivalente conectada ao terminal da LT em questão.

Quando ambas as LTs que compõem o circuito duplo estão em operação, a OV que trafega por uma LT enxerga na barra monitorada o equivalente entre a impedância terminal e a impedância Z_s da linha em paralelo. Assim, havendo ao menos um outro vão de linha conectado

ao terminal monitorado, Z_{eq} assume valores menores que Z_s , resultando em ρ e α positivos. Desse modo, considerando as LTs com comprimentos semelhantes e assumindo a polaridade dos TCs positiva na direção do barramento para a LT, as primeiras OV's incidentes medidas na LT sã e na LT com falta possuem polaridades opostas para casos de faltas internas e polaridades similares para casos de faltas externas, conforme ilustrado nas Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente. Assim, pode-se elaborar um conjunto de rotinas capazes de identificar situações de curtos-circuitos internos e externos com base na análise das amplitudes e polaridades dessas primeiras OV's incidentes, eliminando a necessidade de canais de comunicação e da análise de OV's refletidas no ponto de falta (MAGALHAES *et al.*, 2017).

As OV's analisadas se propagam ao longo da LT com velocidades próximas à da luz (SAHA *et al.*, 2010). Como resultado, a OV incidente e a respectiva OV refletida no terminal monitorado são medidas simultaneamente pelo relé próximo ao barramento. Em outras palavras, o sinal medido pelo relé é o somatório das ondas incidentes e refletidas da seguinte forma:

$$I_S = i_f \cdot (1 + \rho), \quad (3.31)$$

onde I_S é o sinal medido pelo relé correspondente às primeiras OV's incidentes no terminal monitorado. Assim, ao substituir (3.28) em (3.31), tem-se a seguinte expressão:

$$I_S = \frac{V_f}{Z_s + 2R_f} \cdot (1 + \rho). \quad (3.32)$$

A expressão (3.32) correspondente ao sinal I_S é importante no algoritmo proposto. Esta equação permitirá definir o limiar de detecção das OV's medidas no terminal monitorado, possibilitando distinguir situações de operação normal dos SEEs de situações de falta. O limiar de detecção é definido como sendo uma porcentagem do valor máximo esperado de I_S , o qual é dado por (3.32). Este limiar de detecção é calculado tendo como base o valor máximo de I_S , sendo determinado, ao se considerar os parâmetros do sistema da Figura 5.22, o qual gera um valor constante.

De semelhante modo, o mesmo limiar constante também foi aplicado no sistema da Figura 4.3, o qual foi verificado como sendo um valor apropriado, empiricamente, ou seja, após um número considerável de simulações. Maiores detalhes do cálculo do limiar serão abordados no capítulo 4 desta dissertação, definindo com precisão cada parâmetro envolvido na sua determinação.

Após a detecção do sinal I_S pelo relé, a onda refletida pelo terminal monitorado se propaga em direção ao ponto de falta e, posteriormente, é refletida novamente em direção ao terminal monitorado. Estas sucessivas reflexões ocorrem até que toda a energia das OV's seja dissipada.

3.5 COMPONENTES MODAIS

No estudo de OV's em LTs, é importante analisar os sinais de corrente considerando o acoplamento magnético entre fases. Assim, para a análise de OV's, é recomendável que as correntes medidas em componentes de fase sejam transformados em componentes modais independentes (FRANÇA, 2017). Com o objetivo de tornar possível a detecção de todos os tipos de falta, transformadas de Clarke referenciadas a cada fase do sistema são utilizadas nesse trabalho, conforme sugerido em Schweitzer *et al.* (2014), permitindo desacoplar as saídas do filtro DS para se calcular as OV's de loop (SEL, 2017). As OV's de loop devem ser calculadas para ambas LTs de circuito duplo, sendo seis ao todo, as quais são dadas pelas seguintes expressões:

$$TW_{AG}(n) = TW_a(n) - TW_0(n), \quad (3.33)$$

$$TW_{BG}(n) = TW_b(n) - TW_0(n), \quad (3.34)$$

$$TW_{CG}(n) = TW_c(n) - TW_0(n), \quad (3.35)$$

$$TW_{AB}(n) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (TW_a(n) - TW_b(n)), \quad (3.36)$$

$$TW_{BC}(n) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (TW_b(n) - TW_c(n)), \quad (3.37)$$

$$TW_{CA}(n) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (TW_c(n) - TW_a(n)), \quad (3.38)$$

sendo

$$TW_0(n) = \frac{1}{3} \cdot (TW_a(n) + TW_b(n) + TW_c(n)), \quad (3.39)$$

onde TW_a , TW_b e TW_c são os sinais obtidos na saída do filtro DS, TW_0 é a onda de modo terra e TW_{AG} , TW_{BG} , TW_{CG} , TW_{AB} , TW_{BC} e TW_{CA} são as OV's de loop, as quais são equivalentes às transformadas de Clarke referenciadas a cada fase do sistema, assumindo n como sendo o índice da n -ésima amostra do sinal analisado.

Uma vez calculadas as OV's de loop, procede-se para a aplicação do algoritmo de proteção de fato, o qual será responsável por identificar situações de curtos-circuitos internos ou externos em LTs de circuito duplo.

3.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se a fundamentação teórica das OV's, destacando as equações do modelo de LTs a parâmetros distribuídos, as fórmulas para cálculo da impedância de surto e velocidade de propagação de OV's em LTs. Ademais, também foram apresentadas as equações gerais de propagação das OV's, evidenciando características relacionadas à amplitude das OV's e do fenômeno de propagação dessas em LTs.

Em uma segunda etapa, foram apresentados conceitos relacionados ao filtro DS, o qual tem sido aplicado em dispositivos reais de proteção e localização de faltas baseados em OV's. Foram também apresentadas as equações de reflexão e refração das primeiras OV's de corrente em um ponto de descontinuidade nos terminais de LTs de circuito duplo. Apresentou-se também a expressão do sinal de corrente visto pelo relé no terminal monitorado, demonstrando o cálculo de valores de referência para obtenção do limiar de detecção a ser empregado no processo de detecção de OV's. Por fim, realizou-se uma breve discussão a respeito das OV's modais e apresentaram-se os cálculos das OV's de loop, que serão utilizadas para aplicação da função de proteção estudada nesse trabalho.

ALGORITMO IMPLEMENTADO

Neste capítulo, o algoritmo implementado será descrito em detalhes. Com o objetivo de facilitar o entendimento, este capítulo será dividido em cinco partes. Na primeira parte, as possíveis topologias e configurações das LTs de circuito duplo serão analisadas brevemente, discutindo quais destas foram consideradas neste trabalho para a implementação do algoritmo. Na segunda parte, dois esquemas de proteção diferencial cruzada (a tradicional e a percentual, ambas baseadas em grandezas fasoriais de corrente) serão abordados, explicando os princípios do seu funcionamento, os ajustes necessários e seus respectivos equacionamentos matemáticos. Na terceira parte, a proteção diferencial cruzada percentual será mapeada para o domínio das OV's, detalhando seu equacionamento matemático, seus ajustes e os princípios de propagação de OV's, os quais foram mencionados no capítulo 3, que permitem seu funcionamento. Na quarta parte, a implementação numérica do algoritmo será apresentada, explicando em detalhes seus princípios de funcionamento, ajustes e considerações adotadas, encerrando esta parte com um fluxograma que permite resumir as etapas do algoritmo e tornar seu entendimento mais didático. Por fim, na quinta parte, será apresentada a implementação do algoritmo proposto em um sistema teste modelado a partir de parâmetros de um SEE real.

4.1 LTS DE CIRCUITO DUPLO

Conforme já mencionado no Capítulo 1, as LTs de circuito duplo vêm sendo cada vez mais empregadas nos SEEs modernos com o objetivo de suprir a crescente demanda por energia elétrica, garantindo, simultaneamente, segurança e confiabilidade ao sistema elétrico.

Esses circuitos duplos podem ter diversas configurações, considerando a topologia do SEE em questão e a maneira como as LTs estão conectadas em cada um dos terminais do circuito. O trabalho de Apostolov *et al.* (2007) cita as seguintes configurações em LTs de circuito duplo,

cujos circuitos podem inclusive não ter os mesmos comprimentos:

- As LTs não estão conectadas ao mesmo barramento em nenhum dos terminais do circuito.
- As LTs estão conectadas ao mesmo barramento em apenas um dos terminais do circuito.
- As LTs estão conectadas ao mesmo barramento em ambos os terminais do circuito.

Nesta dissertação, a terceira configuração supracitada será a considerada, ou seja, ambas as LTs estão conectadas ao mesmo barramento em ambos os terminais do circuito. Além disso, o algoritmo proposto considera que as LTs ocupam a mesma torre de transmissão, possuindo, tipicamente, o mesmo comprimento. Circuitos duplos em que as LTs compartilham a mesma torre de transmissão são muito comuns (APOSTOLOV *et al.*, 2007), fato este motivador da escolha por esse arranjo simplificado.

Independentemente da topologia e da configuração das LTs de circuito duplo, sabe-se que os circuitos duplos apresentam desafios quando comparados aos circuitos simples no que diz respeito à proteção elétrica. Estes desafios e dificuldades na proteção de circuitos duplos, os quais já foram mencionados nos capítulos 1 e 2, servem de motivação para a implementação da função de proteção diferencial cruzada, a qual se mostra como uma valiosa ferramenta na proteção de LTs com essas características (SANAYE-PASAND; JAFARIAN, 2011).

4.2 PROTEÇÃO DIFERENCIAL CRUZADA BASEADA EM FASORES

4.2.1 Proteção Diferencial Cruzada Tradicional

Neste trabalho, o circuito duplo considerado possui as LTs conectadas a um mesmo barramento em ambos os terminais do sistema, conforme já mencionado. Assim, para apresentar os fundamentos da proteção diferencial cruzada tradicional, considera-se uma LT de circuito duplo típica, como ilustrado na Figura 4.1. Nesse sistema, uma vez que ambos os circuitos operam sob uma mesma tensão nominal, consideram-se parâmetros iguais para ambas as LTs, sendo as impedâncias dos circuitos equivalentes conectadas às fontes de tensão denominadas de Z_L e Z_R .

Resumidamente, o princípio da proteção diferencial cruzada consiste na comparação das amplitudes das correntes que circulam em um mesmo terminal por cada uma das LTs do

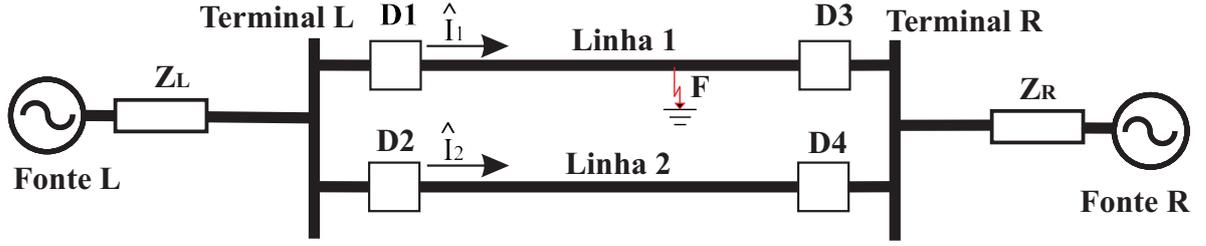


Figura 4.1. Circuito Duplo Tradicional.

circuito duplo. O valor do desvio das amplitudes das correntes medidas em um mesmo terminal é comparado a um valor constante pré-definido, chamado de corrente de restrição I_{res} . Desta forma para situações em que o SEE se encontra em funcionamento normal ou em situações de faltas externas, as correntes medidas nas duas LTs possuem aproximadamente o mesmo valor. Nesses casos, o resultado da subtração entre elas é menor que o valor da constante I_{res} . Por outro lado, para situações de faltas internas em uma das LTs, a subtração resulta em um valor maior que I_{res} , levando o relé de proteção a atuar. Assim, esta lógica é implementada a partir das seguintes inequações:

$$\left| \hat{I}_1 \right| - \left| \hat{I}_2 \right| > I_{res}, \quad (4.1)$$

$$\left| \hat{I}_2 \right| - \left| \hat{I}_1 \right| > I_{res}, \quad (4.2)$$

onde $\left| \hat{I}_1 \right|$ e $\left| \hat{I}_2 \right|$ são as amplitudes dos fasores de corrente que circulam pelas LTs 1 e 2, respectivamente. Assim, se a inequação (4.1) for satisfeita, a falta está localizada na LT 1; caso contrário, se a inequação (4.2) for satisfeita, pode-se dizer que uma falta ocorreu na LT 2.

O valor de I_{res} deve ser definido levando em consideração a maior assimetria verificada no sistema durante o período de funcionamento em regime permanente. Esta assimetria se evidencia pelo fato da constante I_{res} possuir valor superior a:

- Variações no módulo das correntes que circulam nas LTs dos circuitos para situações de faltas externas.
- Máximo valor da corrente de carga para situações em que apenas uma das LTs está em funcionamento.
- Valor da corrente diferencial entre a fase sã e a fase em que se encontra o defeito para o modo de operação sucessivo

Por conta disto, em muitas situações práticas, a constante de restrição acaba por receber valores muito elevados, o que faz com que a sensibilidade da proteção diminua inevitavelmente, sobretudo para situações de elevado carregamento do circuito. Por conta disto, podem ocorrer situações de faltas internas em que o sistema de proteção não consegue detectar a ocorrência do defeito, havendo assim o surgimento de zonas mortas em que a proteção será incapaz de perceber e eliminar defeitos internos (WANG *et al.*, 2005c).

4.2.2 Proteção Diferencial Cruzada Percentual

Com o objetivo de superar as dificuldades da proteção diferencial cruzada tradicional, um elemento diferencial percentual é utilizado a fim de aumentar a sensibilidade do sistema de proteção. Resumidamente, este elemento corresponde a uma substituição da constante de restrição I_{res} definida anteriormente, por um termo percentual na qual a parcela de restrição (lado direito das inequações (4.1) e (4.2)) passa a variar com as amplitudes das correntes medidas em um mesmo terminal, em ambas as LTs do circuito duplo. Nesse cenário, a soma das amplitudes das correntes passa a ser usada como a nova variável de restrição. Caso não ocorra falta ou esta seja externa ao elemento protegido, as correntes \widehat{I}_1 e \widehat{I}_2 medidas pelos TCs nas LT 1 e LT 2 do circuito duplo, respectivamente, apresentarão amplitudes próximas entre si e, nestes casos, a proteção não deve atuar. Por outro lado, caso ocorra uma falta interna, as correntes não mais terão amplitudes próximas, de modo que a proteção deve atuar para eliminar o defeito. Neste último caso, uma das correntes será consideravelmente maior, indicando a LT onde a falta ocorreu.

A lógica da proteção diferencial cruzada percentual é apresentada a seguir, as quais podem ser desenvolvidas de duas formas distintas, segundo Wang *et al.* (2005b):

$$\left| \widehat{I}_1 \right| - \left| \widehat{I}_2 \right| > k \cdot \left(\left| \widehat{I}_1 \right| + \left| \widehat{I}_2 \right| \right) , \quad (4.3)$$

$$\left| \widehat{I}_2 \right| - \left| \widehat{I}_1 \right| > k \cdot \left(\left| \widehat{I}_1 \right| + \left| \widehat{I}_2 \right| \right) , \quad (4.4)$$

ou

$$\left| \widehat{I}_1 - \widehat{I}_2 \right| > k \cdot \left(\left| \widehat{I}_1 + \widehat{I}_2 \right| \right) , \quad (4.5)$$

$$\left| \widehat{I}_2 - \widehat{I}_1 \right| > k \cdot \left(\left| \widehat{I}_1 + \widehat{I}_2 \right| \right) , \quad (4.6)$$

onde k é o coeficiente de operação da proteção, sendo este ajustado também considerando-se a maior assimetria do sistema de maneira análoga à I_{res} da subseção anterior. No presente trabalho, utilizam-se (4.3) e (4.4) para fazer o mapeamento da função percentual cruzada no domínio das OVs. Desta forma, se (4.3) for satisfeita, considera-se uma falta interna na LT 1, ao passo que, se (4.4) for satisfeita, assume-se uma falta interna na LT 2. Se nenhuma das inequações forem atendidas, caracteriza-se uma situação de falta externa ou de operação normal do SEE e para estes casos a proteção não deve atuar.

4.3 MAPEAMENTO DA PROTEÇÃO PERCENTUAL CRUZADA PARA O DOMÍNIO DAS OVS

Conforme já mencionado nos capítulos anteriores desta dissertação, os métodos baseados em OVs possuem vantagens quando comparados aos métodos baseados na análise de componentes fundamentais do ponto de vista dos tempos de operação. De fato, essas funções são aplicadas no domínio do tempo, eliminando a necessidade do processo de estimação fasorial, tornando-as mais rápidas. Além dos métodos baseados em OVs terem tempos de atuação ultra-rápidos, eles se mostram imunes aos efeitos de saturação em TCs (passíveis de ocorrer nos métodos baseados em componentes fundamentais, contribuindo para a degradação do desempenho da proteção) e também eles se mostram imunes às oscilações de potência (ZHANG *et al.*, 2017). Por conta destas vantagens, os métodos baseados em OVs se tornam cada vez mais importantes como alternativa para redução dos tempos de operação das funções baseadas em fasores.

Para o mapeamento que será apresentado, deve-se entender que as OVs de corrente lançadas no circuito duplo possuem características que variam a depender do ponto do sistema onde o defeito ocorreu. Estas características incluem: amplitudes, polaridades e tempo de detecção dos distúrbios. Desta forma, no caso de falta externa ao circuito duplo, quando a OV induzida pela falta incide no terminal local, que é aquele que será monitorado no algoritmo, esta refrata para os circuitos conectados às barras de medição, dividindo-se em OVs com mesmas polaridades e amplitudes próximas, conforme representado na Figura 3.6 no capítulo 3. Por outro lado, em situações de faltas internas, a OV incidente no terminal monitorado é refratada para a LT sã, apresentando polaridade inversa e amplitude menor em relação à OV na LT com falta, desde que ambas as LTs de circuito duplo estejam conectadas e haja pelo mesmo outro vão de linha

conectado ao terminal monitorado, conforme representado na Figura 3.5 no capítulo 3 .

Para a configuração em estudo, considerou-se que as LTs que compõem o circuito duplo possuem circuitos com comprimentos e parâmetros semelhantes. Desta forma, os resultados das simulações que se seguem foram desenvolvidos, levando-se em conta esta simplificação. Baseando-se nesta topologia, percebe-se que as amplitudes e polaridades das primeiras OV_S que incidem no terminal monitorado mudam a depender da posição da falta, ou seja, se ela é externa ou interna ao circuito duplo. Com isso, a equação da proteção percentual cruzada baseada em grandezas fasoriais pode ser adaptada e aplicada ao domínio das OV_S, com algumas modificações.

No algoritmo proposto, seguindo procedimentos típicos de relés aplicados no domínio do tempo, analisam-se as OV_S calculadas para seis loops de falta: AT, BT, CT, AB, BC e CA (SEL, 2017), os quais já foram apresentados nas equações de (3.33) a (3.38). Uma vez obtidas as OV_S de loop, em cada circuito, o algoritmo extrai quatro OV_S de loop, que serão os sinais de fato utilizados no equacionamento da proteção que são os seguintes:

- TW_1 correspondente à OV de loop de maior amplitude medida na LT 1 do circuito duplo;
- TW_{12} correspondente à mesma OV de loop do sinal TW_1 , porém medida na LT 2 do circuito duplo;
- TW_2 correspondente à OV de loop de maior amplitude medida na LT 2 do circuito duplo;
- TW_{21} correspondente à mesma OV de loop do sinal TW_2 , porém medida na LT 1 do circuito duplo.

Por exemplo, se o loop mais forte (loop de maior amplitude) medido na LT 1 corresponder ao loop AG, então TW_1 corresponderá à amplitude do loop AG na LT 1 do circuito duplo, ao passo que TW_{12} corresponderá à amplitude do mesmo loop AG, porém este é medido na LT 2 do circuito duplo. O mesmo procedimento é feito para a LT 2 do circuito, de semelhante modo. Se o loop mais forte (loop de maior amplitude) medido na LT 2 corresponder ao loop AG, então TW_2 corresponderá à amplitude do loop AG na LT 2 do circuito duplo, ao passo que TW_{21} corresponderá à amplitude do mesmo loop AG, porém este é medido na LT 1 do circuito duplo.

Desta forma, após a determinação destes quatro sinais de loop, aplicam-se as adaptações

das inequações da proteção percentual cruzada, as quais são dadas por:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|), \quad (4.7)$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|), \quad (4.8)$$

onde TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} correspondem aos sinais de loop já mencionados, ao passo que k_{OV} corresponde ao coeficiente de operação da proteção baseada em OV, o qual deve ser ajustado levando-se em conta o comportamento de ruídos e interferências durante o regime permanente do sistema. Desta forma, o sistema de proteção consegue restringir a operação para o caso de pequenos ruídos e interferências no SEE.

Analisando as relações apresentadas, nota-se que (4.7) é satisfeita para faltas internas à LT 1, enquanto que (4.8) é satisfeita para faltas internas à LT 2. Se ambas as relações forem satisfeitas, identifica-se uma falta inter-circuitos, a qual envolve fases de ambas as LTs do circuito duplo. Se nenhuma das relações forem atendidas, a falta é classificada como externa.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA DO ALGORITMO

4.4.1 Aplicação do Filtro DS aos Sinais de Corrente

Na entrada do algoritmo proposto, são inseridas as correntes de fase medidas pelos TCs (os eventuais erros nas medições dos TCs não influenciaram o algoritmo) em cada uma das LTs do circuito duplo em um único terminal. Estes sinais são seis, ao todo, sendo eles: ia_{L1} , ib_{L1} , ic_{L1} , ia_{L2} , ib_{L2} e ic_{L2} . Os três primeiros sinais de corrente mencionados correspondem às correntes de fase medidas no terminal local na LT 1 do circuito duplo, ao passo que os três últimos sinais de corrente mencionados correspondem às correntes de fase medidas no terminal local na LT 2. Estes seis sinais de corrente são filtrados utilizando o filtro DS, conforme mencionado anteriormente no capítulo 3. Ressalta-se que o filtro DS possui ganho unitário, possibilitando a análise das amplitudes e polaridades das OVs incidentes no terminal monitorado.

Na saída do filtro DS, são obtidos seis sinais, representados por: TW_{aL1} , TW_{bL1} , TW_{cL1} , TW_{aL2} , TW_{bL2} e TW_{cL2} . Os três primeiros sinais correspondem às OVs de fase medidas no terminal local na LT 1 do circuito duplo, ao passo que os três últimos sinais supracitados correspondem às OVs de fase medidas no terminal local na LT 2 do circuito duplo. Estas OVs

de fase obtidas na saída do filtro DS para ambas as LTs do circuito duplo são calculadas de acordo com as equações de (3.25) a (3.27) apresentadas no capítulo 3. Deve-se frisar que os parâmetros do filtro DS foram ajustados conforme recomendado em SEL (2017). Levando-se em conta este fato, sua janela de coeficientes tem $20 \mu s$, o que implica em $N_{DS} = 20$ para uma taxa de amostragem de 1 MHz, a qual será empregada neste trabalho.

4.4.2 Detecção das primeiras OV's incidentes

Uma vez que as OV's de fase são obtidas, é necessário detectar as primeiras OV's incidentes no terminal monitorado. Esta detecção das primeiras OV's é feita da seguinte forma: somam-se as amplitudes das OV's de corrente em cada uma das fases (a,b e c) em cada uma das LTs do circuito duplo e esta soma é comparada a um limiar pré-definido, o qual é constante e o seu cálculo é feito com o auxílio da equação (3.32) apresentada no capítulo 3. Para calcular o limiar constante, aplica-se uma porcentagem (determinada empiricamente) ao valor máximo esperado da amplitude medida pelo relé dada pela equação (3.32), considerando os parâmetros do sistema teste da Figura 5.22 presentes na Tabela . O valor percentual escolhido foi de **1,2%** das amplitudes máximas esperadas para as OV's medida no terminal local.

O valor que maximiza a amplitude dada pela equação (3.32) acontece quando a tensão de fase de pico do SEE é igual a **204,12kV** ($\frac{\sqrt{2} \cdot 500 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$), Z_s com valor de **233,52 Ω** ($\sqrt{\frac{0,3005}{5,5106 \cdot 10^{-6}}}$), faltas com ângulos de incidência de **90°** e que duas LTs adjacentes com mesma impedância Z_s das LTs de circuito duplo estão conectadas ao terminal local, ou seja, $\rho = 0,5$, resultando em uma amplitude máxima medida pelo relé de **2622 A**. Uma vez feito isto, aplica-se a porcentagem de **1,2%** ao valor máximo calculado (2622 A), resultando em um limiar de detecção de **31 A**.

O limiar é adequado para o sistema da Figura 5.22, uma vez que foi calculado tomando como base o referido sistema, além disto o mesmo limiar também é adequado para o sistema da Figura 4.3, tendo sido verificado empiricamente após um número de simulações consideráveis.

Matematicamente, a detecção das primeiras OV's incidentes no terminal local é feita se a seguinte condição lógica for satisfeita:

$$|TW_{a_{L1}}| + |TW_{b_{L1}}| + |TW_{c_{L1}}| > Lim_L, \quad (4.9)$$

ou

$$|TW_{a_{L2}}| + |TW_{b_{L2}}| + |TW_{c_{L2}}| > Lim_L, \quad (4.10)$$

onde Lim_L corresponde ao limiar para a detecção das primeiras OV's.

Nesta etapa do algoritmo, se a condição lógica dada por (4.9) e (4.10) for satisfeita, então as amplitudes e os instantes de incidência das primeiras OV's incidentes no terminal local são estimados. Por outro lado, caso a condição lógica não seja satisfeita, as OV's não são detectadas e o algoritmo de proteção interpreta que o SEE está em condição normal de operação.

4.4.3 Cálculo das OV's de Loop de Corrente e Seleção das OV's mais Significativas

Uma vez que os instantes de detecção das primeiras OV's foram determinados, o algoritmo passa a calcular as OV's de loop de corrente a partir das OV's de fase obtidas na saída do filtro DS. Conforme abordado no capítulo 3, as OV's de loop são determinadas com o objetivo de desacoplar as OV's e permitir a detecção de todos os tipos de falta no SEE.

Neste trabalho, as OV's de loop são obtidas a partir da Transformada Modal de Clarke referenciada a cada fase do sistema, conforme proposto em Schweitzer *et al.* (2014). Desse modo, são obtidas doze correntes de loop, sendo seis OV's de loop para a LT 1 do circuito duplo medidos no terminal local (TW_{AGL1} , TW_{BGL1} , TW_{CGL1} , TW_{ABL1} , TW_{BCL1} , TW_{CAL1}) e seis OV's de loop para a LT 2 do circuito duplo medidos no terminal local (TW_{AGL2} , TW_{BGL2} , TW_{CGL2} , TW_{ABL2} , TW_{BCL2} , TW_{CAL2}). A forma de calcular as OV's de loop a partir das OV's de fase está descrita nas equações de (3.33) a (3.38) no capítulo 3.

Neste momento, definem-se dois vetores contendo as amplitudes de todas as OV's de loop relacionadas às LT 1 e LT 2 do circuito duplo, sendo que estas amplitudes são determinadas no instante de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal local, considerando os valores de pico das ondas triangulares filtradas a partir do filtro DS. Desta forma, os vetores considerados no algoritmo são os seguintes:

$$OV_{L1} = [|TW_{AGL1}(N_{LFIRST})| |TW_{BGL1}(N_{LFIRST})| |TW_{CGL1}(N_{LFIRST})| |TW_{ABL1}(N_{LFIRST})| |TW_{BCL1}(N_{LFIRST})| |TW_{CAL1}(N_{LFIRST})|], \quad (4.11)$$

$$OV_{L2} = [|TW_{AGL2}(N_{LFIRST})| |TW_{BGL2}(N_{LFIRST})| |TW_{CGL2}(N_{LFIRST})| |TW_{ABL2}(N_{LFIRST})| |TW_{BCL2}(N_{LFIRST})| |TW_{CAL2}(N_{LFIRST})|], \quad (4.12)$$

em que OV_{L1} e OV_{L2} são os vetores que contêm todas as OV's de loop medidas no terminal local para as LTs 1 e 2 do circuito, respectivamente, e N_{LFIRST} corresponde ao número da amostra relativo ao instante de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal local.

Uma vez que todas as OV's de loop foram calculadas e representadas nos vetores OV_{L1} e OV_{L2} , é necessário determinar as OV's mais significativas para a falta em questão. As OV's mais significativas são os sinais TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} já definidos na seção 4.3 deste capítulo. Lembrando que TW_1 corresponde a OV de loop de maior amplitude do vetor OV_{L1} , TW_2 corresponde a OV de loop de maior amplitude do vetor OV_{L2} , TW_{12} correspondente à mesma OV de loop do sinal TW_1 , porém medida na LT 2 do circuito duplo e TW_{21} correspondente à mesma OV de loop do sinal TW_2 , porém medida na LT 1 do circuito duplo.

4.4.4 Identificação do Circuito com Falta e Seleção das Fases Defeituosas

Quando o algoritmo identifica os quatro sinais TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} correspondentes às OV's mais significativas para a falta em questão, aplica-se o conjunto de inequações dadas por (4.7) e por (4.8), as quais se encontram descritas na seção 4.3. Essas inequações permitem distinguir entre a ocorrência de faltas externas ou internas ao elemento protegido, funcionando da seguinte forma: caso somente a expressão (4.7) seja satisfeita, então a proteção identifica falta interna na LT 1. Por outro lado se somente a expressão (4.8) for satisfeita, então a proteção identifica falta interna na LT 2. Se ambas as relações forem satisfeitas simultaneamente, a proteção identifica falta inter-circuitos (neste caso, ambas as LTs do circuito estão envolvidas na falta). Por fim, se nenhuma das relações forem satisfeitas, a falta é classificada como externa.

Baseado-se no princípio exposto, pode-se concluir que (4.7) e (4.8), além de distinguir situações de faltas externas ou internas, permitem também identificar as LTs do circuito duplo onde a falta ocorreu para situações de faltas internas. Quando o sistema de proteção identifica a ocorrência de uma falta interna à LT protegida, este passa a selecionar as fases defeituosas, visando viabilizar o uso do algoritmo em sistemas com *trip* monopolar. Desta forma, quando

uma falta interna ocorre em apenas uma das LTs do circuito duplo, têm-se os seguintes critérios de seleção de fases:

$$\frac{|TW_{aL_1}(N_{LFIRST})| + |TW_{aL_2}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL}(N_{LFIRST})} > 0,33 \Rightarrow \text{falta na Fase A} , \quad (4.13)$$

$$\frac{|TW_{bL_1}(N_{LFIRST})| + |TW_{bL_2}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL}(N_{LFIRST})} > 0,33 \Rightarrow \text{falta na Fase B} , \quad (4.14)$$

$$\frac{|TW_{cL_1}(N_{LFIRST})| + |TW_{cL_2}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL}(N_{LFIRST})} > 0,33 \Rightarrow \text{falta na Fase C} , \quad (4.15)$$

onde TW_a , TW_b , TW_c são as OV's nas fases a, b e c no terminal local, cujos subscritos L_1 e L_2 representam as LTs 1 e 2 do circuito duplo, respectivamente, N_{LFIRST} corresponde ao número da amostra relativo ao instante de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal local e TW_{TOTL} é um valor de normalização que corresponde ao somatório dos módulos das OV's medidas em ambos os circuitos.

O valor de 0,33 do limiar usado na seleção das fases aplicada via (4.13), (4.14) e (4.15) foi escolhido com base na distribuição das OV's induzidas pela falta no terminal monitorado. De fato, espera-se que as amplitudes das OV's nas fases envolvidas no defeito sejam maiores do que as amplitudes das OV's nas fases sãs. Assim, torna-se possível identificar as fases com falta, permitindo que o algoritmo emita *trips* apenas para as fases defeituosas, quando for de interesse. Cabe ressaltar que os critérios de seleção de fases defeituosas dadas pelas expressões de (4.13) a (4.15) funcionam para as faltas consideradas clássicas, as quais consistem em curtos-circuitos que ocorrem em apenas uma das LTs do circuito duplo.

O algoritmo também faz a seleção das fases defeituosas quando da ocorrência de uma falta interna inter-circuitos, situação esta que os critérios de seleção se modificam e passam a ser os seguintes:

$$TW_{TOTL1}(N_{LFIRST}) = |TW_{aL_1}(N_{LFIRST})| + |TW_{bL_1}(N_{LFIRST})| + |TW_{cL_1}(N_{LFIRST})|, \quad (4.16)$$

$$TW_{TOTL2}(N_{LFIRST}) = |TW_{aL_2}(N_{LFIRST})| + |TW_{bL_2}(N_{LFIRST})| + |TW_{cL_2}(N_{LFIRST})|, \quad (4.17)$$

$$\frac{|TW_{aL_1}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL1}(N_{LFIRST})} > 1,45 \cdot 0,33 \Rightarrow \text{falta na Fase A na LT 1} , \quad (4.18)$$

$$\frac{|TW_{bL_1}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL1}(N_{LFIRST})} > 1,45 \cdot 0,33 \Rightarrow \text{falta na Fase B na LT 1} , \quad (4.19)$$

$$\frac{|TW_{cL_1}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL1}(N_{LFIRST})} > 1,45 \cdot 0,33 \Rightarrow \text{falta na Fase C na LT 1} , \quad (4.20)$$

$$\frac{|TW_{aL2}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL2}(N_{LFIRST})} > 1,45 \cdot 0,33 \Rightarrow \textit{falta} \text{ na Fase A na LT 2 ,} \quad (4.21)$$

$$\frac{|TW_{bL2}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL2}(N_{LFIRST})} > 1,45 \cdot 0,33 \Rightarrow \textit{falta} \text{ na Fase B na LT 2 ,} \quad (4.22)$$

$$\frac{|TW_{cL2}(N_{LFIRST})|}{TW_{TOTL2}(N_{LFIRST})} > 1,45 \cdot 0,33 \Rightarrow \textit{falta} \text{ na Fase C na LT 2 ,} \quad (4.23)$$

onde TW_{TOTL1} e TW_{TOTL2} são valores de normalização que correspondem ao somatório dos módulos das OV's de fase nas LTs 1 e 2 do circuito duplo, respectivamente.

O valor relativamente alto do limiar $(1,45 \cdot 0,33)$ nas expressões de (4.18) a (4.23) justifica-se pelo fato de que existe uma proporcionalidade entre as amplitudes das OV's em cada uma das LTs do circuito duplo, de forma que as maiores amplitudes ocorrerão justamente nas fases onde ocorreram os defeitos para cada um dos circuitos. Assim, torna-se possível identificar as fases com falta em cada um dos circuitos duplos, permitindo que o algoritmo emita *trips* tripolares para cada uma das LTs constituintes do circuito duplo. Cabe ressaltar que os critérios de seleção de fases defeituosas dadas pelas expressões de (4.18) a (4.23) funcionam para as faltas inter-circuitos desde que não envolvam as mesmas fases, pois esta é uma situação em que a proteção diferencial cruzada não consegue identificar o distúrbio, confundindo-o com a ocorrência de uma falta externa, conforme reportado em Sanaye-Pasand & Jafarian (2011).

4.4.5 Lógica de Trip do Algoritmo Proposto

Uma vez que o algoritmo já determinou a LT com defeito e identificou as fases defeituosas para situações de faltas, o método proposto passa a implementar a lógica de trip para o sistema de proteção. No caso de situações de faltas internas em apenas umas das LTs do circuito duplo, o algoritmo identifica quais são as fases defeituosas com auxílio dos critérios (4.13), (4.14) e (4.15). Se apenas uma única fase do SEE estiver defeituosa, o sistema de proteção aplica um *trip* monopolar na respectiva fase com defeito, mas se mais de uma fase estiver envolvida no defeito, o sistema de proteção emite um *trip* tripolar, desligando todas as fases do respectivo circuito, onde a falta ocorreu. A opção por *trips* monopolares é que estes são uma forma eficaz de reduzir inseguranças e instabilidades transitórias em SEEs Youssef (2002).

Em uma situação de falta inter-circuitos, consideram-se casos em que somente uma fase de cada circuito está envolvida no defeito, sendo esta uma situação que normalmente ocorre

nos SEEs (SHARAFI *et al.*, 2011). Nestes casos, o sistema de proteção aplica unicamente *trips* tripolares em cada um dos circuitos. Por exemplo, ao identificar uma falta do tipo A_1B_2 (envolvendo a fase A da LT 1 e a fase B da LT 2 do circuito duplo), a proteção emite *trips* tripolares em cada circuito duplo, desabilitando as duas LTs que estavam em operação antes do defeito.

Tendo apresentado o algoritmo em detalhes, apresenta-se na Figura 4.2, em forma de fluxograma, uma descrição resumida de todas as etapas do algoritmo, com o objetivo de ilustrar o método e facilitar o seu entendimento. No fluxograma, os sinais de entrada são as seis correntes de fase, sendo três medidas na LT 1 do terminal local ($iabc_{L1}$) e três medidas na LT 2 do terminal local ($iabc_{L2}$). Na saída do filtro DS, são obtidas as OV's de fase na LT 1 do terminal local ($TWabc_{L1}$) e as OV's de fase na LT 2 do terminal local ($TWabc_{L2}$). Posteriormente, o algoritmo faz a detecção do pico das primeiras OV's incidentes, com este objetivo definem-se os sinais Sum_{abcL1} e Sum_{abcL2} , os quais correspondem as expressões do lado esquerdo das inequações (4.9) e (4.10), respectivamente. A amplitude e o instante de detecção das primeiras OV's incidentes são obtidas, caso o sinal Sum_{abcL1} ou o sinal Sum_{abcL2} excedam o limiar pré-definido, caso nenhum deles exceda o limiar, a proteção interpreta que não houve falta no SEE.

Ainda analisando o fluxograma, nota-se que ao determinar o instante de detecção das primeiras OV's incidentes (N_{LFIRST}), o algoritmo calcula a amplitude dos loops de corrente neste instante de detecção e obtém na saída os vetores de loop OV_{L1} e OV_{L2} definidos com base nas equações 4.11 e 4.12, respectivamente. A partir dos sinais de loop das LTs 1 e 2 do circuito duplo, o algoritmo extrai as OV's de loop mais significativas nas LTs 1 e 2 do circuito duplo. Com isto obtém-se quatro sinais, os quais serão os efetivamente utilizados no algoritmo, que correspondem a seguinte nomenclatura: TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} .

A partir destes quatro sinais se aplicam as inequações correspondentes à condição de operação da proteção na LT 1 (inequação (4.7)) e à condição de operação da proteção na LT 2 (inequação (4.8)). Por meio destas inequações da proteção diferencial cruzada percentual mapeada para o domínio das OV's, podem-se identificar situações de faltas internas clássicas, situações de faltas internas inter-circuitos e situações de faltas externas. Para o caso das faltas internas, o algoritmo ainda identifica em qual LT do circuito duplo o defeito ocorreu. Se o algoritmo de proteção identificar uma situação de falta clássica, este passa a aplicar o algoritmo

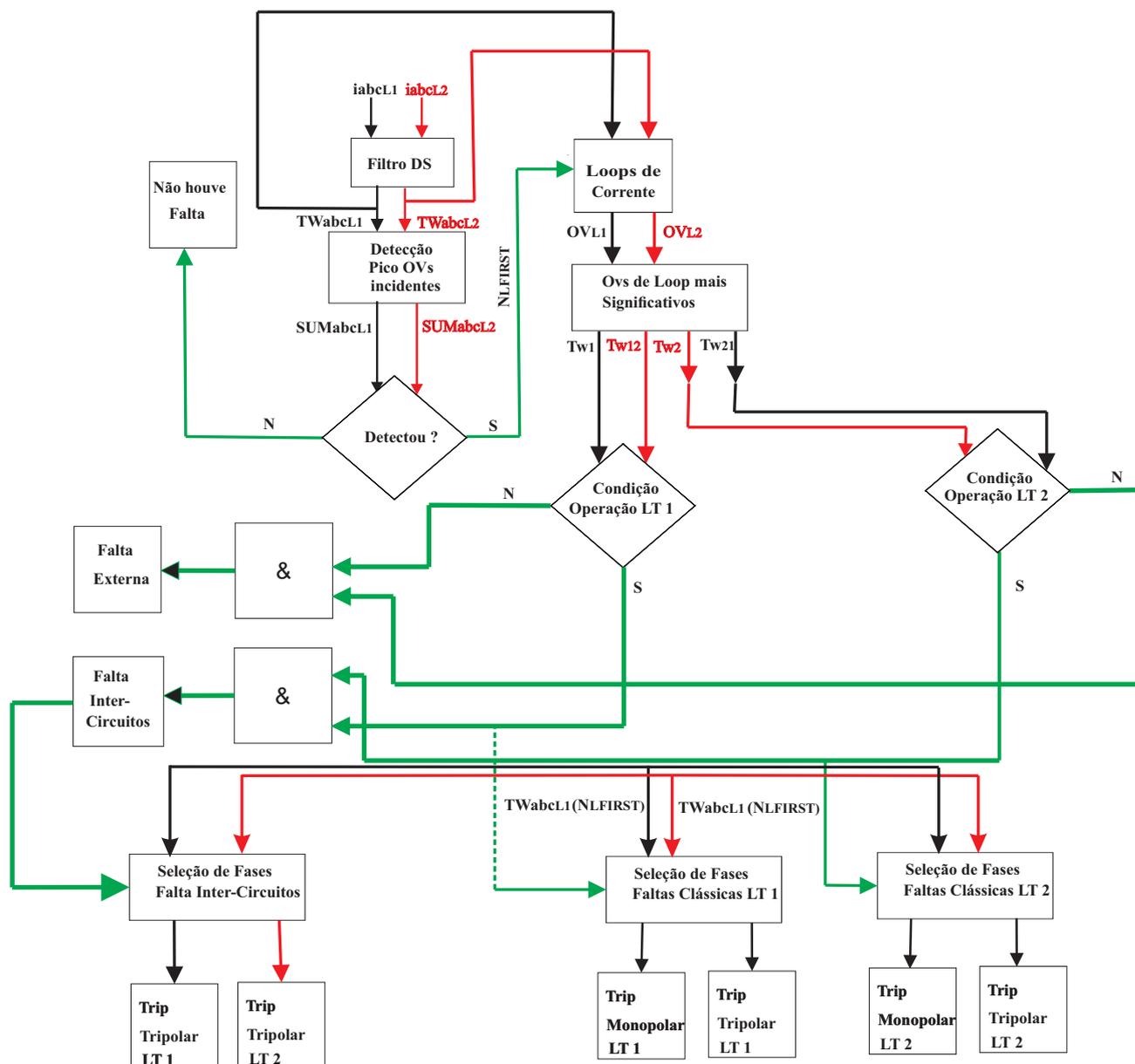


Figura 4.2. Fluxograma do algoritmo.

de seleção de fases defeituosas via (4.13), (4.14) e (4.15). Caso apenas uma única fase esteja em falta, o algoritmo aplica um trip monopolar, se por outro lado mais de uma fase estiver em falta, o trip aplicado passa a ser tripolar. Estes trips irão ocorrer na LT do circuito duplo, que o algoritmo identificou na etapa anterior.

Caso o algoritmo de proteção identifique uma situação de falta inter-circuitos, este passa a aplicar o algoritmo de seleção de fases defeituosas via critérios de (4.18) a (4.23). O algoritmo, neste caso, aplicará um trip tripolar na LT 1 e na LT 2 do circuito duplo que estão envolvidas na falta inter-circuitos.

4.5 CASOS EXEMPLOS

Como o objetivo de apresentar uma análise detalhada do princípio de funcionamento do algoritmo de proteção baseado em OV's de corrente, dois casos exemplos serão apresentados a seguir. As situações de falta foram simuladas em um sistema de teste proposto pelo *IEEE Protective Relaying Committee* IEEE PSRC (2004), conforme representado na Figura 4.3, o qual permite validar o algoritmo proposto e demonstrar a operação da proteção.

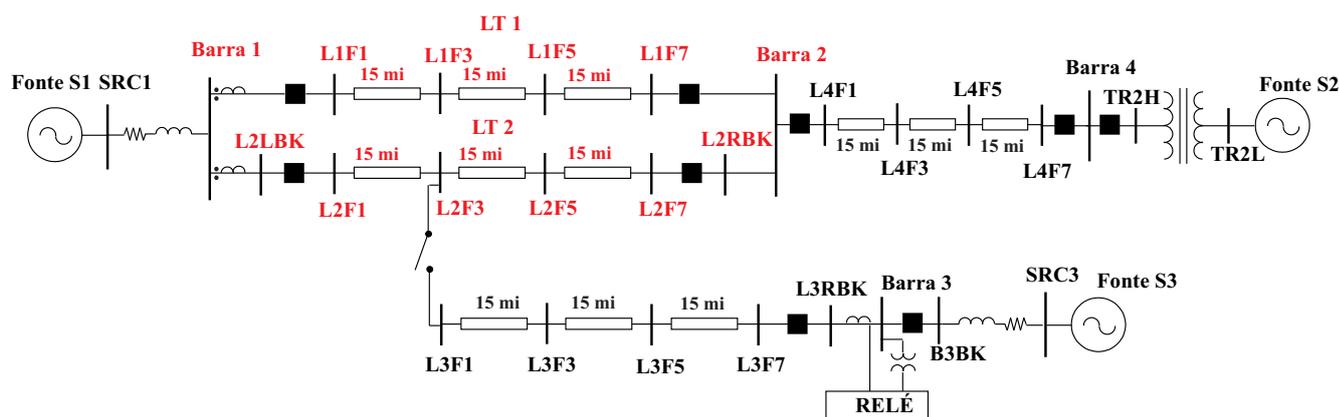


Figura 4.3. Sistema teste de 230 kV proposto pelo IEEE Power System (IEEE PSRC, 2004).

O sistema teste representado na Figura 4.3 possui tensão nominal de 230 kV, sendo adequado para testar a maioria das aplicações de proteção de LT. O sistema teste é composto de vários componentes (LTs, transformadores, fontes, etc). S1 e S3 correspondem às fontes de tensão no SEE, ao passo que S2 corresponde a uma máquina síncrona de 830 MVA. A chave representada no SEE da Figura 4.3 permite obter uma LT de três terminais de medição quando fechada. Nas simulações desta dissertação baseadas neste sistema teste, a chave sempre será mantida aberta de forma que a LT de circuito duplo possuirá apenas dois terminais de medições, sendo esta a configuração a ser considerada nas simulações. Resumidamente, o circuito duplo consistirá em um par de LTs com acoplamento mútuo (entre as barras 1 e 2).

Cada uma das LTs do sistema teste é composta por três seções de 15 milhas de comprimento e todos os nomes dos nós apresentados na Figura 4.3 são os mesmos utilizados no arquivo base de simulação. Os parâmetros físicos de cada um dos componentes elétricos, que constituem o SEE da Figura 4.3 são apresentados na referência IEEE PSRC (2004).

As simulações foram realizadas no *ATP*, considerando um passo de integração de $1 \mu s$, visando obter registros que simulam uma taxa de amostragem de 1 MHz. Para tornar a simulação

mais realística, filtros anti-aliasing do tipo Butterworth de 3ª ordem também foram modelados, considerando uma frequência de corte em 400 kHz. As LTs do sistema teste da Figura 4.3 foram modeladas a parâmetros distribuídos e constantes na frequência. As constantes utilizadas nas simulações do sistema teste são apresentados na Tabela 4.1 e correspondem aos seguintes valores:

Tabela 4.1. Parâmetros adotados nas simulações

Parâmetro	Valores
Frequência de Amostragem (f_s)	1 MHz
Frequência do Filtro Anti-Aliasing (f_c)	400 kHz
Janela de Coeficientes do Filtro DS (T_{DS})	20 μs
Limiar de detecção das OV's (Lim_L)	31 A
Coeficiente de Operação (k_{OV})	0,03

O valor baixo do coeficiente de operação k_{OV} pode ser justificado devido à configuração do sistema teste da Figura 4.3. Isso se deve ao fato do equivalente de Thévenin da fonte S1 ligado à Barra 1 ser consideravelmente maior que a impedância de surto das LTs que compõem o circuito duplo. Por conta disto, quando a OV induzida por uma falta interna ao circuito duplo incide no terminal local, grande parcela da amplitude da OV incidente refrata para a linha sã, de forma que as amplitudes das OV's, embora sejam diferentes e com polaridades opostas, terão valores próximos. Assim, k_{OV} deve ser ajustado em um valor menor para se ter mais sensibilidade na detecção de faltas internas ao circuito duplo.

Vale ressaltar que mesmo com o valor pequeno de k_{OV} , a proteção é capaz de diferenciar faltas externas de internas ao elemento protegido, uma vez que a OV induzida por uma falta externa divide-se igualmente entre as duas LTs que compõem o circuito duplo, já que ambas LTs apresentam os mesmos parâmetros. Desta forma, espera-se que o sistema de proteção continue seguro e confiável. Deve ser observado que a proteção diferencial cruzada requer que ambas as LTs estejam em operação para operar corretamente, caso uma das LTs esteja fora de operação, esta proteção deve ser bloqueada para que não ocorram atuações indevidas e a proteção diferencial longitudinal deve passar a ser utilizada.

4.5.1 Falta no Ponto L1F3

Para a análise numérica do algoritmo de proteção, considerou-se uma falta monofásica A-T com resistência de falta de 5Ω (valor arbitrado pelo autor), ângulo de incidência de 60° e localizada no ponto L1F3 da Figura 4.3. A falta A-T foi considerada neste exemplo, pois é a falta mais comum de ocorrer em SEEs (PAITHANKAR; BHIDE, 2007). Os sinais de corrente de fases medidos no terminal local pelos TCs (após já terem passado pelo filtro anti-aliasing descrito na subseção anterior) correspondem à entrada do algoritmo e eles passarão inicialmente pelo filtro DS, através do qual serão filtrados.

No filtro DS, são obtidas as OV's de fase em cada um dos circuitos duplos. A partir destas OV's de fases, identificam-se os instantes de detecção das primeiras OV's incidentes e as respectivas amplitudes nestes instantes. Esta etapa do algoritmo fornece os seguintes valores para as OV's de fase nas LTs 1 e 2 do circuito duplo: $TW_{aL1}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-260,96 A}$, $TW_{bL1}(N_{LFIRST}) = \mathbf{11,62 A}$, $TW_{cL1}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-6,90 A}$, $TW_{aL2}(N_{LFIRST}) = \mathbf{247,80 A}$, $TW_{bL2}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-5,20 A}$, $TW_{cL2}(N_{LFIRST}) = \mathbf{10,06 A}$. O termo N_{LFIRST} corresponde ao número da amostra em que ocorre o instante de detecção das OV's incidentes e nesta simulação corresponde ao valor de **50094**. Ao se multiplicar N_{LFIRST} pelo passo de integração de $1 \mu s$, calcula-se o instante de detecção (t_{detect}) igual à **0,050094**. O algoritmo de proteção é executado em tempo real e o instante (N_{LFIRST}) é determinado quando o primeiro sinal de OV excede o limiar pré-determinado, quando isto ocorre o valor de (N_{LFIRST}) deve ser armazenado na memória do algoritmo.

Posteriormente, as amplitudes das OV's de loop são calculadas no instante de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal local e os resultados são representados em Amperes nos vetores OV_{L1} e OV_{L2} dados por:

$$OV_{L1} = [\mathbf{175,54}; 97,03; 78,50; 157,38; 10,70; 146,67]$$

$$OV_{L2} = [\mathbf{163,58}; 89,41; 74,16; 146,06; 8,81; 137,25]$$

Os termos em negrito mostram quais são as OV's mais significativas selecionadas pelo algoritmo, desta forma ele seleciona os quatro sinais ($TW_1, TW_{12}, TW_2, TW_{21}$), os quais são os seguintes: $|TW_1| = \mathbf{175,54}$; $|TW_{12}| = \mathbf{163,58}$; $|TW_2| = |TW_{12}|$ e $|TW_{21}| = |TW_1|$. A partir destes sinais, aplicam-se (4.7) e (4.8) com o objetivo de identificar a LT do circuito duplo com

defeito. Assim, consideram-se as seguintes análises matemáticas relacionadas à operação da proteção:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 175,54 - 163,58 > 0,03 \cdot (175,54 + 163,58)$$

$$11,96 > 10,18? \text{ Sim} \Rightarrow \text{falta na LT 1 do circuito duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 163,58 - 175,54 > 0,03 \cdot (175,54 + 163,58)$$

$$-11,96 > 10,18? \text{ Não} \Rightarrow \text{não houve falta na LT 2 do circuito duplo}$$

Depois de identificar a falta como ocorrendo em apenas um circuito do circuito duplo (falta clássica), o algoritmo aplica o critério de seleção de fases da seguinte forma:

$$\frac{|TW_{aL1}(NLFIRST)| + |TW_{aL2}(NLFIRST)|}{TW_{TOTL}(NLFIRST)} > 0,33 \Rightarrow \frac{|-260,96| + |247,80|}{542,54} > 0,33$$

$$0,94 > 0,33? \text{ Sim} \Rightarrow \text{falta na fase A}$$

$$\frac{|TW_{bL1}(NLFIRST)| + |TW_{bL2}(NLFIRST)|}{TW_{TOTL}(NLFIRST)} > 0,33 \Rightarrow \frac{|11,62| + |-5,20|}{542,54} > 0,33$$

$$0,03 > 0,33? \text{ Não} \Rightarrow \text{não houve falta na fase B}$$

$$\frac{|TW_{cL1}(NLFIRST)| + |TW_{cL2}(NLFIRST)|}{TW_{TOTL}(NLFIRST)} > 0,33 \Rightarrow \frac{|-6,90| + |-10,06|}{542,54} > 0,33$$

$$0,03 > 0,33? \text{ Não} \Rightarrow \text{não houve falta na fase C}$$

Como o algoritmo identificou a falta em somente uma das fases, o comando de *trip* da proteção será monopolar. Assumindo que o curto-circuito foi aplicado em 50 ms (50000 μ s), pode-se dizer o tempo de atuação do sistema de proteção será de apenas 94 μ s, tempo este que foi obtido por meio do seguinte cálculo: 50094 (t_{detect}) μ s - 50000 μ s (tempo de ocorrência do curto-circuito A-T). O valor pequeno do tempo de atuação da proteção confirma o fato dos métodos baseados em OV's serem ultra-rápidos.

Vale ressaltar que tempos adicionais, os quais incluem tempo de processamento e esforço computacional não foram o foco deste trabalho, visto que se trata de um estudo preliminar para implementação do algoritmo. O objetivo é avaliar o quão rápida é este tipo de proteção sem considerar o efeito destas variáveis, mas em trabalhos futuros espera-se tornar o algoritmo mais completo.

4.5.2 Falta no Ponto L4F5

Para o segundo caso de falta a ser avaliado, considera-se uma falta monofásica A-T externa ao circuito duplo com impedância de falta de 5Ω (valor arbitrado pelo autor), ângulo de incidência de 60° e localizada no ponto L4F5 da Figura 4.3 . Outra vez os sinais de corrente de fases medidos no terminal local pelos TCs (após já terem passado pelo filtro anti-aliasing) correspondem à entrada do algoritmo e eles passarão inicialmente pelo filtro DS, onde serão filtrados.

No filtro DS, são obtidas as OV's de fase em cada um dos circuitos duplos. A partir destas OV's de fases, identificam-se os instantes de detecção das primeiras OV's incidentes e as respectivas amplitudes nestes instantes. Esta etapa do algoritmo fornece os seguintes valores para as OV's de fase nas LTs 1 e 2 do circuito duplo: $TW_{aL1}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-23,67 A}$, $TW_{bL1}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-13,78 A}$, $TW_{cL1}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-15,80 A}$, $TW_{aL2}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-23,67 A}$, $TW_{bL2}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-13,78 A}$, $TW_{cL2}(N_{LFIRST}) = \mathbf{-15,80 A}$. O termo N_{LFIRST} vale **50583** e o termo t_{detect} vale **0,050583**.

Depois disso, o algoritmo identifica as amplitudes das OV's de loop no instante t_{detect} , que serão representadas nos vetores OV_{L1} e OV_{L2} , cujas entradas são medidas em Amperes:

$$OV_{L1} = [\mathbf{5,92}; 3,97; 1,95; 5,71; 1,17; 4,54]$$

$$OV_{L2} = [\mathbf{5,92}; 3,97; 1,95; 5,71; 1,17; 4,54]$$

Outra vez os termos em negrito mostram quais são as OV's mais significativas escolhidas pelo algoritmo, desta forma os sinais TW_1 , TW_{12} , TW_2 , TW_{21} , serão: $|TW_1| = \mathbf{5,92}$; $|TW_{12}| = \mathbf{5,92}$; $|TW_2| = |TW_{12}|$ e $|TW_{21}| = |TW_1|$. A partir destes sinais, aplicaram-se as inequações (4.7) e (4.8) com o objetivo de identificar qual a LT do circuito duplo onde o defeito está ocorrendo. Ao se aplicar as inequações, avalia-se o desempenho da proteção a seguir:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 5,92 - 5,92 > 0,03 \cdot (5,92 + 5,92)$$

$$0 > 0,3552? \text{ Não} \Rightarrow \mathbf{n\tilde{a}o\ houve\ falta\ na\ LT\ 1\ do\ circuito\ duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 5,92 - 5,92 > 0,03 \cdot (5,92 + 5,92)$$

$$0 > 0,3552? \text{ Não} \Rightarrow \mathbf{n\tilde{a}o\ houve\ falta\ na\ LT\ 2\ do\ circuito\ duplo}$$

Como (4.7) e (4.8) não foram satisfeitas, a proteção identifica a falta como sendo externa ao circuito duplo e por conta disto não atua para eliminar o defeito, cabendo à proteção da LT adjacente identificar e eliminar o curto-circuito.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os princípios do algoritmo proposto, explicando os detalhes da sua implementação. Na primeira parte deste capítulo, foram abordadas as possíveis topologias e configurações de LTs de circuito duplo, destacando a configuração que foi utilizada nos sistemas testes desta dissertação, que consiste em LTs conectadas ao mesmo barramento em ambos os terminais do circuito.

Posteriormente, na segunda parte, foram abordados dois esquemas de proteção diferencial cruzada (a tradicional e a percentual, ambas baseadas em grandezas fasoriais de corrente) e suas características, ajustes e equacionamentos matemáticos foram apresentados. Nesta parte do capítulo, explicou-se o comportamento destes esquemas de proteção baseados em grandezas fasoriais para diferentes cenários de falta, ressaltando as condições de operação bem como eventuais limitações.

Na terceira parte do capítulo, apresentou-se o mapeamento da proteção diferencial percentual para o domínio das OV's, em que a propagação destas frentes de ondas foi abordada para diferentes cenários de faltas. Com isso, demonstrou-se ser possível, a partir das características das OV's (amplitudes, polaridades e instantes de detecção), identificar o circuito e fase em que o curto-circuito ocorreu. Desta forma, a equação da proteção percentual cruzada baseada em grandezas fasoriais pôde ser adaptada e aplicada ao domínio das OV's, com algumas modificações, permitindo a implementação de um esquema de proteção mais rápido sem perda de confiabilidade.

Na quarta parte do capítulo, a implementação numérica do algoritmo foi apresentada e explicada em etapas. A primeira etapa do algoritmo consistiu na aplicação do filtro DS aos sinais de corrente de fase medidos pelos TCs no terminal monitorado em cada uma das LTs do circuito duplo. A segunda etapa do método consistiu na definição de critérios para a detecção das primeiras OV's incidentes no terminal monitorado, sendo que este instante de detecção é

obtido a partir das OV's de fase obtidas na saída do filtro DS. Na sequência, na terceira etapa do algoritmo, ocorreu o cálculo das OV's de loop no instante de detecção das primeiras OV's incidentes e depois a seleção das OV's de loop mais significativas, as quais foram as efetivamente utilizadas no algoritmo.

A penúltima etapa do algoritmo consistiu em, a partir das OV's mais significativas obtidas na etapa anterior, identificar o circuito com falta (LT 1 ou LT 2) e aplicar os critérios de seleção de fases, os quais variam para casos de faltas clássicas ou inter-circuitos. Por fim, a última etapa do algoritmo consistiu na definição da lógica de *trip* do método de proteção, que pode ser monopolar ou tripolar para o caso das faltas clássicas ou somente tripolar para o caso de faltas inter-circuitos no circuito duplo.

Na quinta parte deste capítulo, apresentaram-se exemplos numéricos de implementação do algoritmo proposto a partir de um sistema teste real apresentado pelo *IEEE Protective Relaying Committee* IEEE PSRC (2004). Estes exemplos numéricos consistiram na simulação de dois casos de falta: uma falta monofásica A-T com resistência de falta de 5Ω , ângulo de incidência de 60° e localizada no ponto L1F3 da Figura 4.3 e outra falta monofásica A-T com resistência de falta de 5Ω , ângulo de incidência de 60° e localizada no ponto L4F5 da Figura 4.3. A simulação destes dois casos de falta permitiu a avaliação do algoritmo de proteção apresentado, evidenciando o seu passo-a-passo de aplicação.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de avaliar o desempenho da proteção diferencial cruzada mapeada para o domínio das OV's, serão apresentados os resultados de simulações realizadas com o auxílio do software ATP. Os resultados estão divididos em duas categorias: simulações de casos pontuais de falta e simulações em massa. Para se obter os resultados das simulações de casos pontuais, o sistema representado na Figura 4.3 será considerado, cujos parâmetros elétricos estão descritos em IEEE PSRC (2004). No caso das simulações em massa, foram assumidas situações de curtos-circuitos inter-circuitos, com o intuito de demonstrar a viabilidade do algoritmo mesmo para situações mais críticas. O sistema considerado nessa avaliação consistiu em uma rede elétrica de transmissão de 500 kV/60 Hz, no qual foram variados parâmetros de falta e do sistema a exemplo da distância de falta d , SIR, comprimento das LTs l e resistência de falta R_f , ao passo que os ângulos de incidência ficaram constantes em 90° .

Nos casos pontuais, serão simulados diferentes tipos de falta e serão avaliados, no tempo, o comportamento e o desempenho do algoritmo de proteção, no que diz respeito à velocidade de detecção de faltas e à confiabilidade na seleção das fases defeituosas no SEE analisado. Com as simulações em massa, pretende-se demonstrar a forma como variações de determinados parâmetros influenciam no desempenho do algoritmo de proteção proposto. Os parâmetros de simulação são apresentados na Tabela 4.1, sendo utilizados apenas nos casos pontuais. Por outro lado, nas simulações em massa, os parâmetros de simulação são alterados, os quais são apresentados oportunamente ao longo deste capítulo.

5.1 O SOFTWARE ATP

O *ATP* é um programa gratuito para a análise de transitórios eletromagnéticos em SEEs, o qual surgiu na década de 80 devido à dissidência de W. Scott Meyer do *EMTP Development*

Coordination Group (DCG). Este grupo cuidava do aperfeiçoamento, documentação, manutenção e suporte do EMTP para a empresa *Bonneville Power Administration* (BPA). Quando esta decidiu comercializar o EMTP, em acordo com o *Electric Power Research Institute* (EPRI) e o DCG, W. Scott Meyer e Tsu-huei Liu, em discordância, coordenaram um grupo para a criação do *ATP*, o qual foi proposto inicialmente como plataforma alternativa para simulação de transitórios eletromagnéticos (FILHO; PEREIRA, 1996; TAVARES *et al.*, 2003).

O *ATP* aplica um algoritmo de cálculo de circuitos desenvolvido por Dommel (1969), o qual faz uso da regra de integração trapezoidal para discretizar elementos a parâmetros concentrados, representando-os através de equações de diferenças. Para modelagem de LTs a parâmetros distribuídos, o software tem como opção o uso do modelo de Bergeron, o qual é empregado nesta dissertação. Além disso são aplicadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes durante a resolução dos sistemas lineares, através dos quais são realizados os cálculos de grandezas elétricas a cada intervalo de tempo discreto, o qual é conhecido como passo de integração.

No *ATP* estão disponíveis diversos modelos prontos para serem usados na montagem e simulação de SEEs. Dentre eles, podem ser listados (LEUVEN, 1987):

- Elementos a parâmetros concentrados;
- Elementos acoplados;
- Modelos PI-Equivalentes Polifásicos;
- Transformadores;
- Linhas de transmissão;
- Elementos não-lineares;
- Fontes e Chaves;
- Compensadores estáticos e válvulas conversoras.

O programa pode fornecer respostas no tempo para tensões nos nós e ramos ou para correntes de ramos, além de fluxos de potência. Além disso, se necessário, o *ATP* possui uma solução de regime permanente que pode ser considerada para a análise de fasores. Embora existam diversos modelos de dispositivos disponíveis na plataforma computacional do *ATP*, modelos de curtos-circuitos não são contemplados. Assim, para representar a ocorrência de diferentes tipos de curto-circuitos, utilizou-se neste trabalho o modelo de falta ilustrado na Figura 5.1(a).

Conforme ilustrado, no modelo de falta utilizado, a representação de curto-circuitos está associada a operações de abertura e fechamentos de chaves temporizadas, que simulam diferentes instantes de incidência e eliminação de faltas no sistema simulado. Ademais, no modelo, introduzem-se resistências, cujos valores são variados a fim de se representar curtos-circuitos com diferentes resistências de falta. O sistema representado na Figura 5.1(a) é adequado para a aplicação de faltas clássicas no SEE analisado, sendo importante para a avaliação do comportamento do algoritmo proposto. Por outro lado, o sistema utilizado para a aplicação de faltas inter-circuitos consistiu na configuração representada na Figura 5.1(b), onde 1 e 2 são subíndices correspondentes às LTs 1 e 2 do circuito duplo, respectivamente, R_{F1F2} corresponde aos valores das resistências entre as fases do circuito 1 e 2, e R_{terra} corresponde à resistência aplicada à terra para as faltas que envolvem a terra. Os detalhes dos valores de resistência considerados para cada tipo de falta serão detalhados posteriormente.

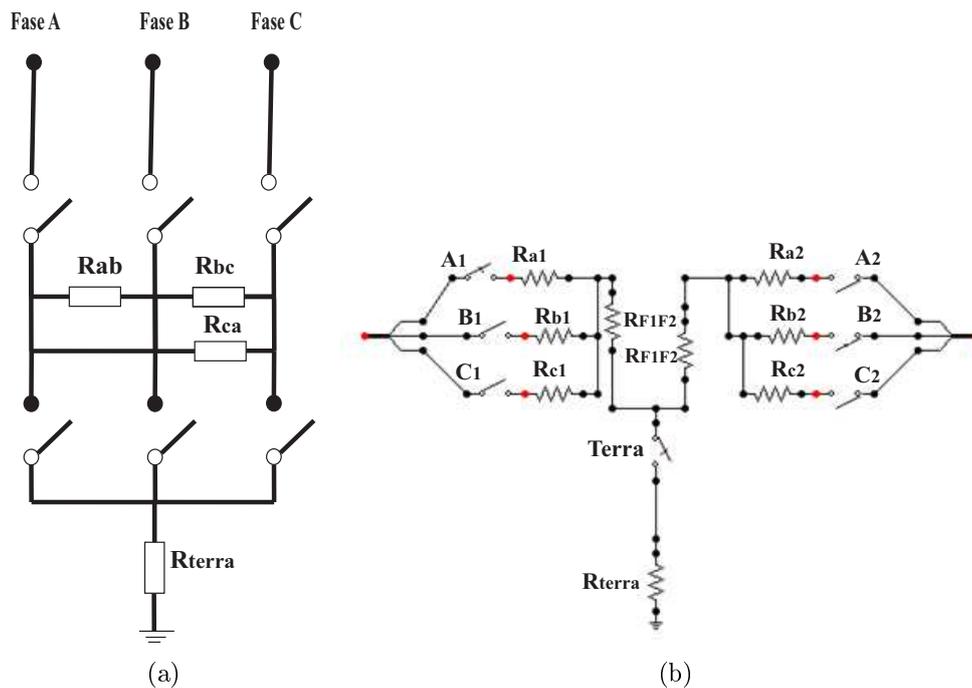


Figura 5.1. Modelo para aplicação de faltas no sistema teste simulado: (a) Faltas clássicas; (b) Faltas inter-circuitos.

5.1.1 A Linguagem MODELS

A MODELS é uma linguagem de programação estruturada anexa ao *ATP*, voltada para a simulação no domínio do tempo e que pode ser usada para descrever a dinâmica do com-

portamento de sistemas físicos complexos (DUBE, 1996). O *ATP* também apresenta a TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), que fornece modelos prontos de dispositivos que se comunicam diretamente com o *ATP* como chaves e fontes. Seu principal objetivo é permitir o uso de técnicas de controle sobre os sistemas simulados, e para isso, apresenta funções pré-definidas que facilitam a criação de diagramas de blocos que compõe as malhas de controle. Por outro lado, a MODELS apresenta potencial para representar todas estas funções e modelos já existentes, dando ainda a liberdade de uma linguagem de programação de alto nível para a criação de novas funcionalidades.

Com a MODELS é possível criar modelos de componentes do SEE que não são contemplados pelo *ATP* nem pela TACS, ou que não apresentem as características desejadas. Os modelos são compostos de nome, entradas, variáveis internas, uma sequência de comandos e saídas. Depois de criados cada um deles se torna uma caixa preta que pode ser reutilizada individualmente ou para se tornar parte de modelos maiores e mais complexos. Todos os sinais de corrente e tensão calculados pelo *ATP* podem ser enviadas à MODELS, onde podem ser manipulados fazendo uso de uma sintaxe simples e que apresenta uma gama de funções pré-definidas com grande versatilidade para a implementação de diversos dispositivos. Abaixo estão resumidas algumas características da MODELS:

- Linguagem de programação de alto nível e fácil compreensão, semelhante em alguns aspectos às linguagens Pascal e Fortran.
- Permite o controle de algumas variáveis da simulação no *ATP*.
- Pode gerar resposta no tempo das variáveis internas aos modelos criados.
- Serve de interface entre o *ATP* e subrotinas feitas em linguagens como C e Fortran.
- Permite a visualização da dinâmica da interação entre o sistema e os modelos criados.

Este conjunto de características torna a combinação do *ATP* e da MODELS uma importante ferramenta para a simulação do desempenho de sistemas de proteção. Nas simulações realizadas, a linguagem MODELS foi utilizada com o objetivo de efetuar a impressão de registros oscilográficos tomados da linha de circuito duplo com falta, onde são representados os sinais de corrente medidos pelos TCs em ambas as LTs do circuito duplo em estudo, o qual está representado na Figura 4.3.

5.2 SIMULAÇÕES PONTUAIS

Nessa primeira etapa de simulações computacionais são analisados casos pontuais de faltas no sistema teste. Curto-circuitos são aplicados em diferentes locais da LT de circuito duplo e a resposta da proteção durante o processo de eliminação da falta é verificada. Para estas simulações pontuais, conforme já mencionado, será considerado o sistema proposto pelo *IEEE Protective Relaying Committee* em IEEE PSRC (2004). O sistema a ser simulado foi ilustrado anteriormente na Figura 4.3, onde são apresentados os nomes dos nós de aplicação das faltas. O sistema modelado no ATPDraw para realização das simulações de faltas pontuais no ATP está representado na Figura 5.2.

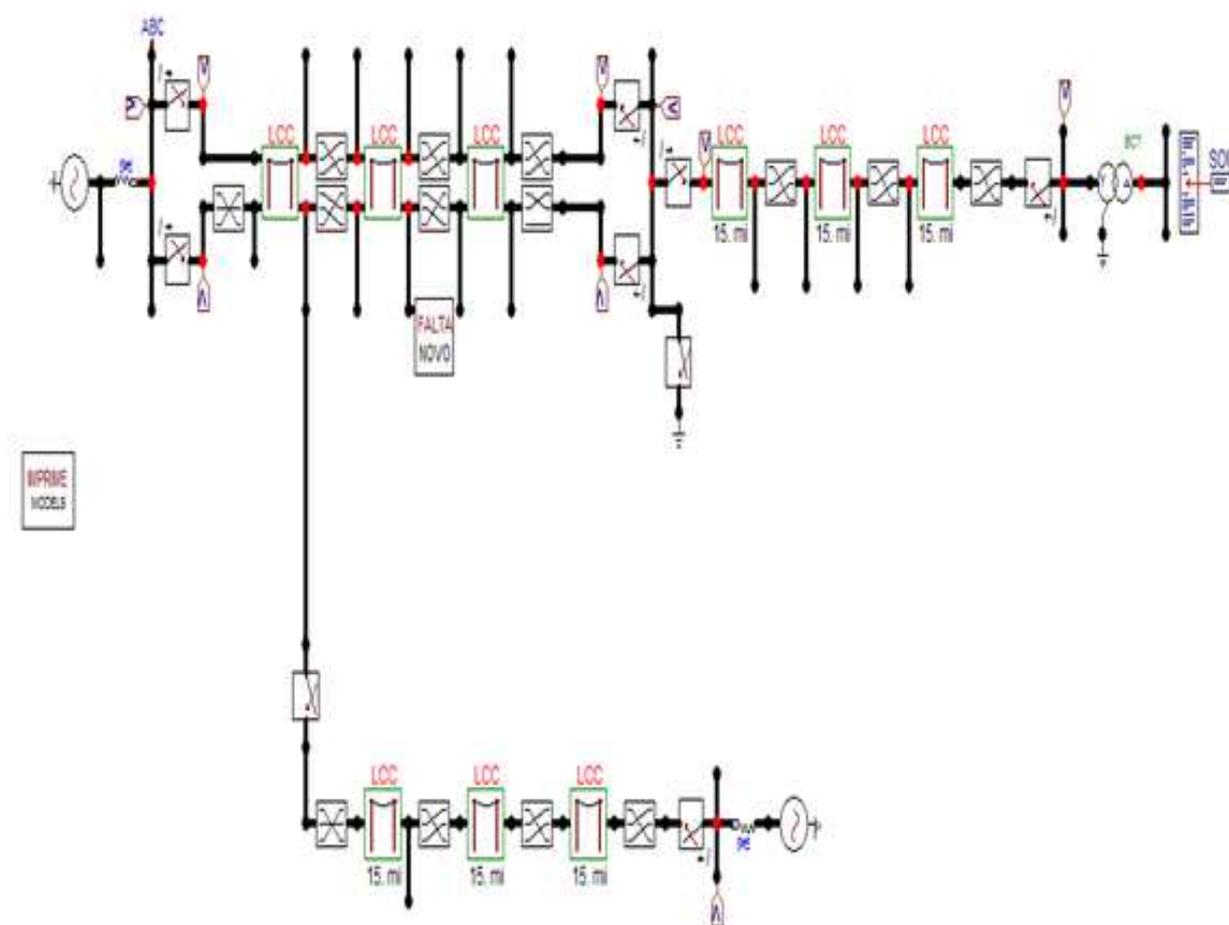


Figura 5.2. Sistema teste de 230 kV utilizado nas simulações computacionais: implementação no ATPDraw.

Para fins de ilustração do algoritmo proposto, o valor da resistência de falta para todas as simulações pontuais foi tomado como sendo 10Ω , valor típico considerado na análise de casos

reais (GOMES, 2014). A análise da influência da localização de falta e do valor da impedância de falta será melhor avaliada na seção 5.3, onde são apresentados os resultados relacionados às simulações em massa considerando um modelo simplificado de um sistema de potência fictício.

5.2.1 Simulação Pontual 1: Curto-Circuito Interno A-T na LT 1, no Ponto L1F3 com Ângulo de Incidência de 90°

Nesse primeiro caso pontual, simulou-se a aplicação de um curto monofásico A-T ($R_{terra} = 10 \Omega$) localizado na LT 1 do circuito duplo em $\frac{1}{3}$ do seu comprimento, considerando um ângulo de incidência de 90° . O ângulo de incidência de 90° representa o fato da falta ocorrer no instante de passagem da tensão na 'fase a' pelo seu valor máximo. As correntes de fase medidas pelos TCs, as quais servem de entrada para o algoritmo, são dados na Figura 5.3. A reta vertical em vermelho na Figura 5.3 representa o instante de ocorrência do curto-circuito, o qual ocorreu em **0,0485 s**. O valor do instante do curto-circuito, em geral não é conhecido na prática. Didaticamente, considerou-se o conhecimento deste valor para permitir estimar o tempo de detecção das faltas pelo algoritmo de proteção proposto.

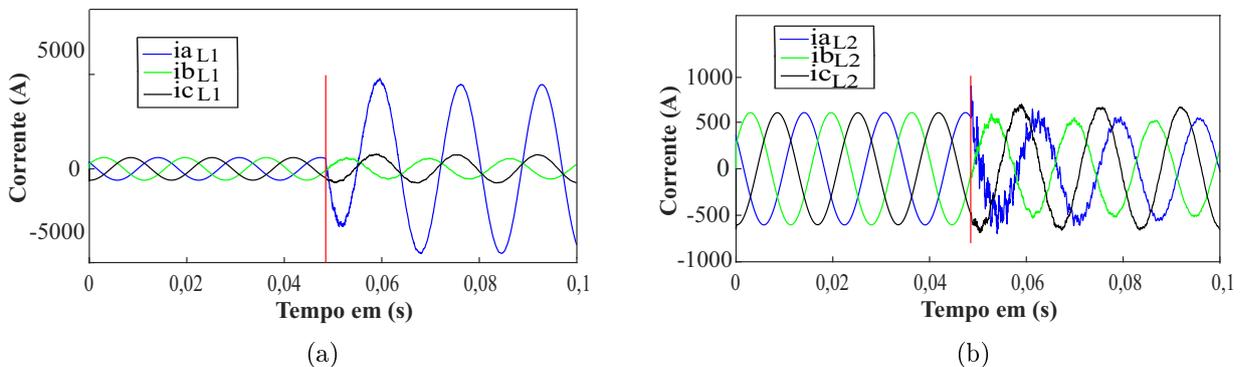


Figura 5.3. Correntes de fase medidas (Caso 1): (a) na LT 1 (b) na LT 2.

As correntes de fase nas LTs do circuito duplo passam pelo filtro DS, obtendo-se as OV's nas fases a, b e c de cada circuito. Na Figura 5.4, são representados os sinais Sum_{abcL1} e Sum_{abcL2} , que já foram mencionados no capítulo 4. No exemplo, esses sinais excederam o limiar de detecção das OV's, definido como sendo 31 A e representado pela linha horizontal laranja na Figura 5.4. Desta forma, o algoritmo de proteção identifica a ocorrência de um distúrbio nas LTs e determina o instante relacionado ao pico do sinal transitório avaliado que será tomado como

instante de chegada das OV's no terminal monitorado. Esse processo de detecção do distúrbio é importante para a lógica do algoritmo de proteção pois, conforme explicado anteriormente, é a partir deste que são determinadas as amplitudes das OV's de interesse.

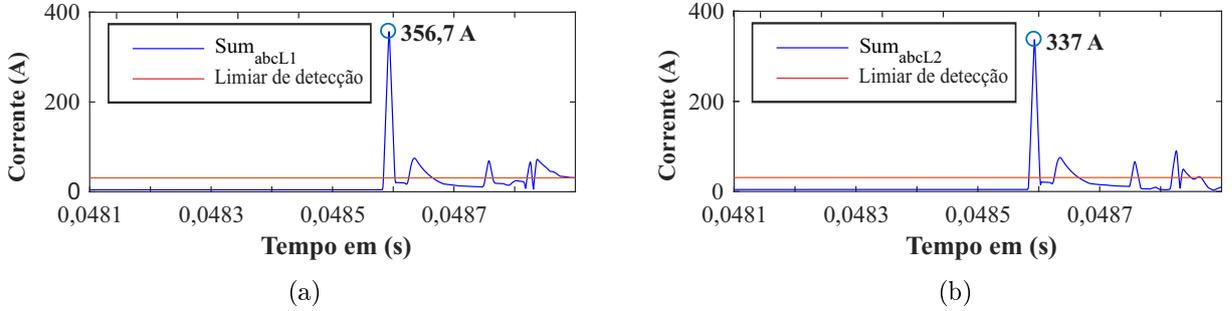


Figura 5.4. Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 1): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2} .

Posteriormente, as amplitudes das OV's de loop são determinadas no instante de detecção das primeiras OV's incidentes ao terminal local, e a partir delas, determinam-se as OV's mais significativas. Estas OV's mais significativas correspondem aos sinais TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} . Na Figura 5.5, ilustram-se esses quatro sinais, os quais são usados para determinar ou não a operação da proteção proposta. Para tanto, conforme explicado anteriormente, aplicam-se as seguintes relações:

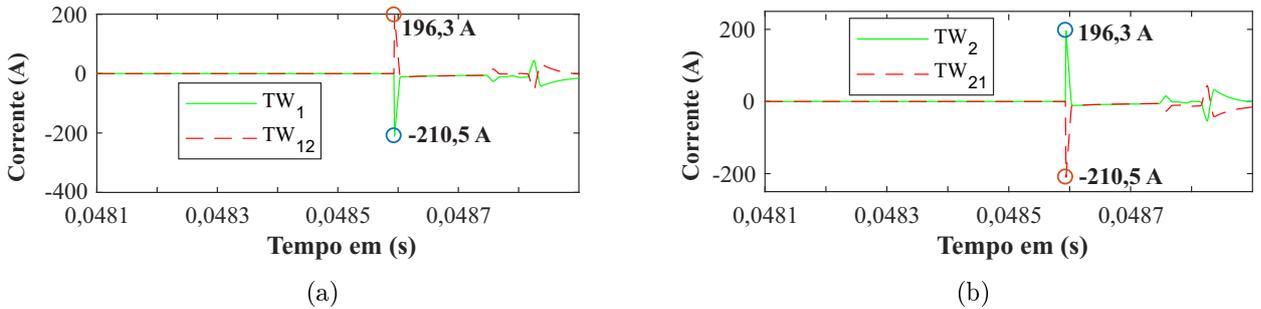


Figura 5.5. OV's mais significativas (Caso 1): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21} .

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 210,5 - 196,3 > 0,03 \cdot (210,5 + 196,3)$$

$$14,2 > 12,21? \text{ Sim} \Rightarrow \text{falta na LT 1 do circuito duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 196,3 - 210,5 > 0,03 \cdot (210,5 + 196,3)$$

$$-14,2 > 12,21? \text{ Não} \Rightarrow \text{não houve falta na LT 2 do circuito duplo}$$

Desta forma, o algoritmo identifica o curto-circuito como sendo interno à LT 1 do circuito duplo, conforme esperado. Como se trata de uma falta clássica, aplicam-se os critérios (4.13),

(4.14) e (4.15) a fim de identificar as fases defeituosas no circuito duplo. A Figura 5.6 representa a aplicação destes critérios, onde a linha horizontal na cor roxa corresponde ao limiar de seleção de fases e assume o valor de 0,33 e os sinais $TW aL_{norm}$, $TW bL_{norm}$ e $TW cL_{norm}$ correspondem às expressões do lado esquerdo das inequações (4.13), (4.14) e (4.15), respectivamente.

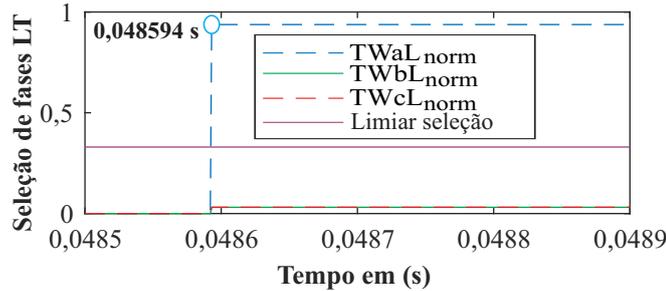


Figura 5.6. Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 1).

Conforme ilustrado na Figura 5.6, o instante de detecção do curto-circuito pela proteção cruzada proposta foi de **0,048594 s**. Como a falta envolve apenas uma das fases, no caso a ‘fase a’, a proteção emite um trip monopolar nesta fase defeituosa em $94 \mu s$, que corresponde a subtração do instante de detecção da falta (**0,048594 s**) pelo instante de ocorrência do defeito (**0,0485 s**). Assim, pode-se dizer que a proteção se comportou conforme o esperado.

5.2.2 Simulação Pontual 2: Curto-Circuito Interno BC-T na LT 1, no Ponto L1F3 com Ângulo de Incidência de 30°

Nesse segundo caso pontual, simulou-se um curto-circuito bifásico terra BC-T ($R_{bc} = 0 \Omega$ e $R_{terra} = 10 \Omega$) no instante **0,0513 s**, localizado na LT 1 do circuito duplo em $\frac{1}{3}$ de seu comprimento, considerando um ângulo de incidência de 30° . Os sinais de corrente de fase medidos nas LTs 1 e 2 são apresentados na Figura 5.7.

Adicionalmente, na Figura 5.8, apresentam-se os sinais Sum_{abcL1} e Sum_{abcL2} , através dos quais detecta-se a ocorrência de um distúrbio, visto que os sinais excedem o limiar de detecção das OV, que é definido como sendo 31A.

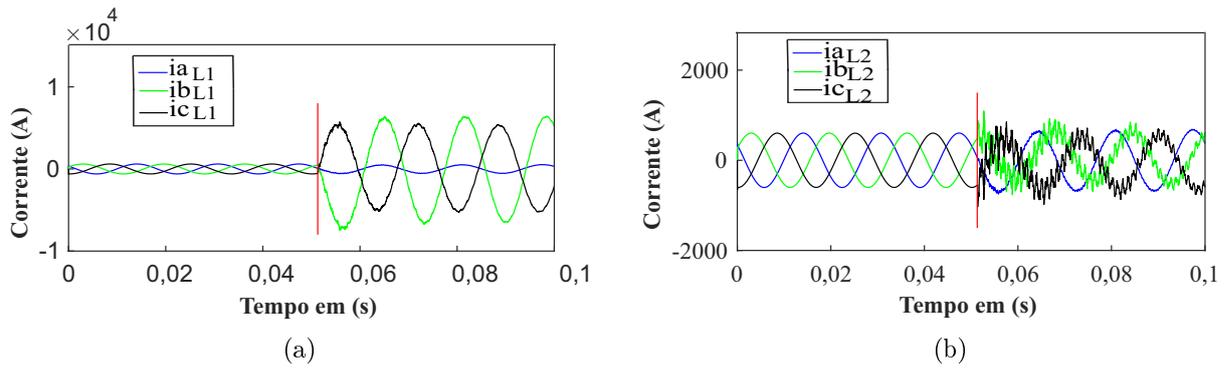


Figura 5.7. Correntes de fase medidas (Caso 2): (a) na LT 1 (b) na LT 2.

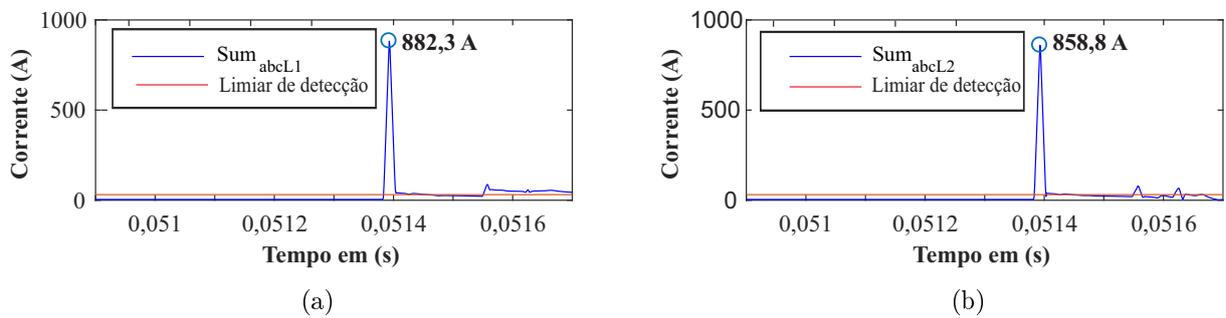


Figura 5.8. Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 2): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2} .

Na Figura 5.9, apresentam-se os sinais TW_1 , TW_{12} , TW_2 , TW_{21} obtidos. Assim, são estimadas as OV's mais significativas e, na sequência, aplicam-se as inequações de operação da proteção diferencial cruzada para o domínio das OV's da seguinte forma:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 250,7 - 217,3 > 0,03 \cdot (250,7 + 217,3)$$

$$33,4 > 14,04? \text{ Sim} \Rightarrow \text{falta na LT 1 do circuito duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 217,3 - 250,7 > 0,03 \cdot (250,7 + 217,3)$$

$$-33,4 > 14,04? \text{ Não} \Rightarrow \text{não houve falta na LT 2 do circuito duplo}$$

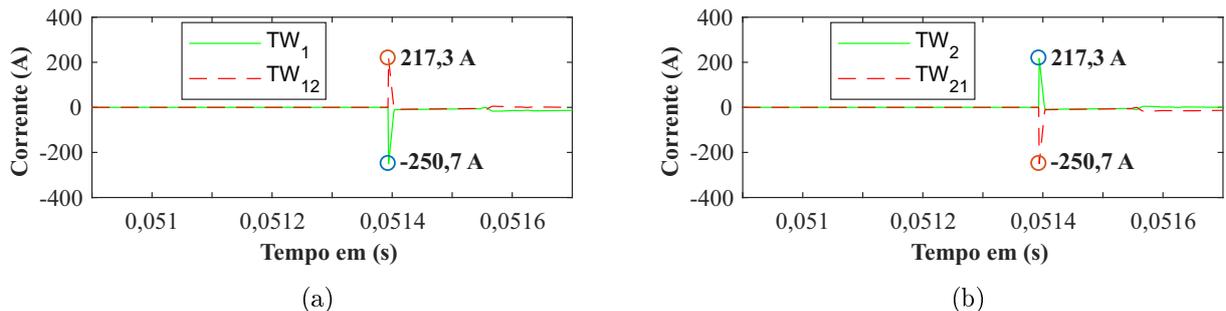


Figura 5.9. OV's mais significativas (Caso 2): (a) $TW_1 \times TW_{12}$ (b) $TW_2 \times TW_{21}$.

Conforme demonstrado, o algoritmo identifica o curto-circuito como sendo interno à LT 1 do circuito duplo, conforme esperado. A Figura 5.10 representa a aplicação dos critérios para seleção de faltas clássicas, onde a linha horizontal na cor roxa corresponde ao limiar de seleção de fases. Dos resultados, nota-se que o curto-circuito foi identificado pela proteção no instante **0,051394 s**, identificando corretamente as duas fases defeituosas, nesse caso, fases B e C na LT 1 do circuito duplo. Assim, a atuação da proteção resultou em um trip tripolar, o qual foi emitido $94 \mu\text{s}$ após o início do distúrbio, valor este obtido da subtração de **0,051394 s** (instante de detecção da falta) por **0,0513 s** (instante de ocorrência do defeito).

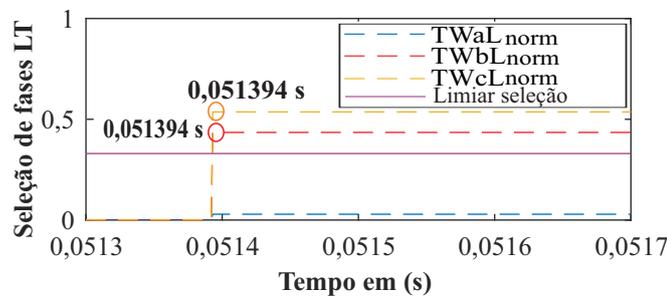


Figura 5.10. Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 2).

5.2.3 Simulação Pontual 3: Curto-Circuito Interno CA-T na LT 2, no Ponto L2F3 com Ângulo de Incidência de 60°

Nesse caso, simulou-se um curto-circuito bifásico terra CA-T ($R_{ca} = 0 \Omega$ e $R_{terra} = 10 \Omega$) localizado na LT 2 do circuito duplo em $\frac{1}{3}$ do seu comprimento no instante **0,05 s**, considerando um ângulo de incidência de 60° . Os sinais de corrente medidos nas LTs 1 e 2 são ilustrados na Figura 5.11, sendo a reta vertical em vermelho o instante de ocorrência da falta. Os resultados obtidos para essa simulação são apresentados nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14.

Pela Figura 5.12, percebe-se que os sinais Sum_{abcL1} e Sum_{abcL2} indicam a ocorrência de um distúrbio, visto que ambos excedem o limiar de detecção das OV's e desta forma o algoritmo de proteção identifica o instante de detecção das primeiras OV's incidentes no terminal local.

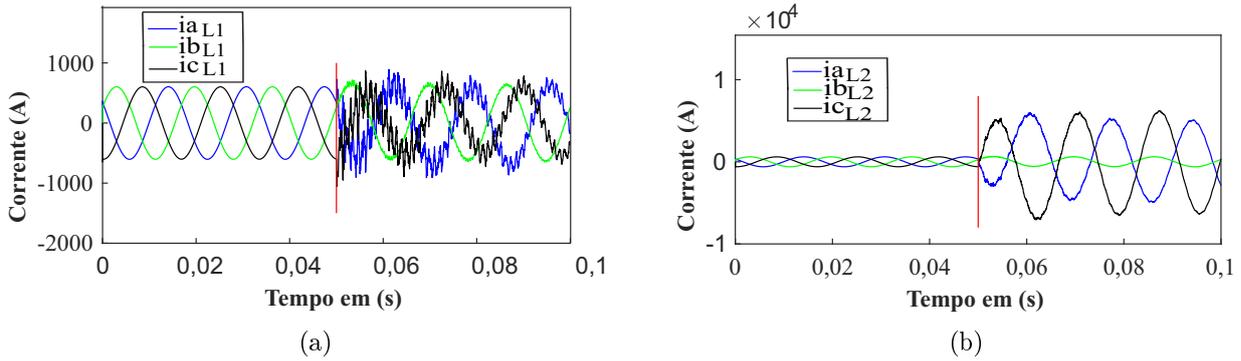


Figura 5.11. Correntes de fase medidas (Caso 3): (a) na LT 1 (b) na LT 2.

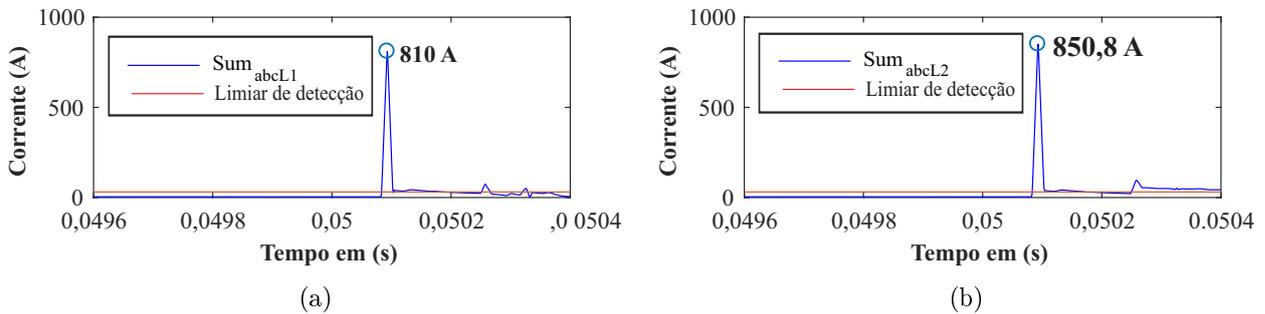


Figura 5.12. Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 3): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2} .

Na Figura 5.13, as OV's mais significativas são representadas e aplicando-se as condições de operação nas LTs, tem-se que:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 200 - 238,4 > 0,03 \cdot (200 + 238,4)$$

$$-38,4 > 13,152? \text{ Não} \Rightarrow \text{n\~{o} houve falta na LT 1 do circuito duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 238,4 - 200 > 0,03 \cdot (200 + 238,4)$$

$$38,4 > 13,152? \text{ Sim} \Rightarrow \text{falta na LT 2 do circuito duplo}$$

Desta forma, o algoritmo identifica o curto-circuito como interno à LT 2, conforme esperado.

A Figura 5.14 representa a aplicação dos critérios para seleção de faltas clássicas, onde se observa

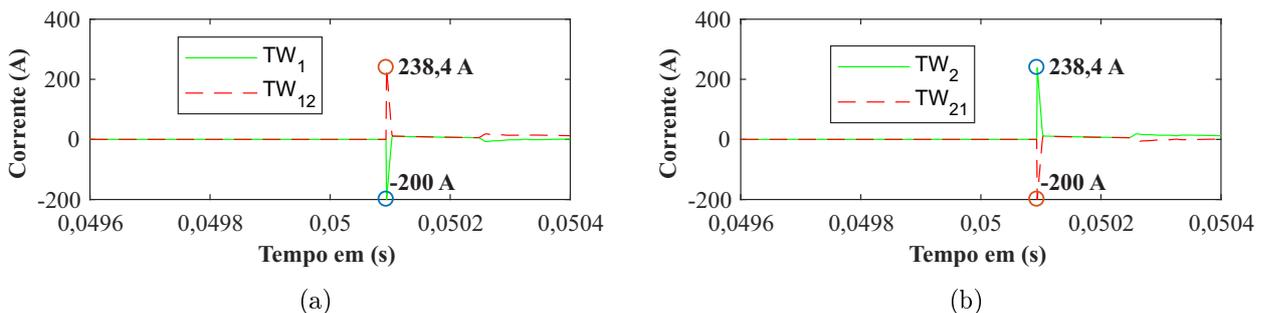


Figura 5.13. OV's mais significativas (Caso 3): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21} .

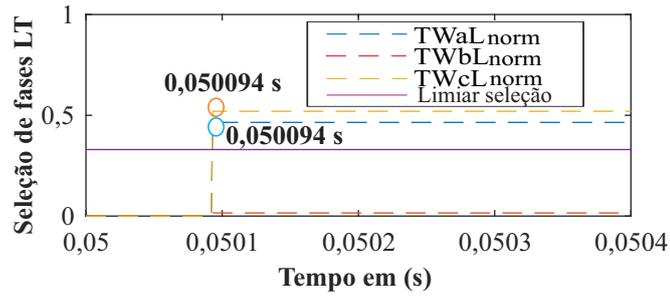


Figura 5.14. Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 3).

que o algoritmo identificou as fases A e C como sendo as fases defeituosas. Nesse caso, a proteção emitiria um trip tripolar na LT 2 do circuito duplo em **0,050094 s**, podendo-se dizer que o seu tempo de operação seria de $94 \mu\text{s}$, valor este correspondente à subtração do instante de detecção da falta (**0,050094 s**) pelo instante de ocorrência do defeito (**0,05 s**).

5.2.4 Simulação Pontual 4: Curto-Circuito Interno AB na LT 1, no Ponto L1F5 com Ângulo de Incidência de 45°

Nesse caso, simulou-se a aplicação de um curto bifásico AB ($R_{ab} = 10 \Omega$) iniciado em **0,0506 s** e localizado na LT 1 do circuito duplo em $\frac{2}{3}$ do seu comprimento, com ângulo de incidência de 45° . Os sinais de corrente medidos nas LTs 1 e 2 são dados na Figura 5.15. Os resultados obtidos nessa simulação são representados nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 a seguir.

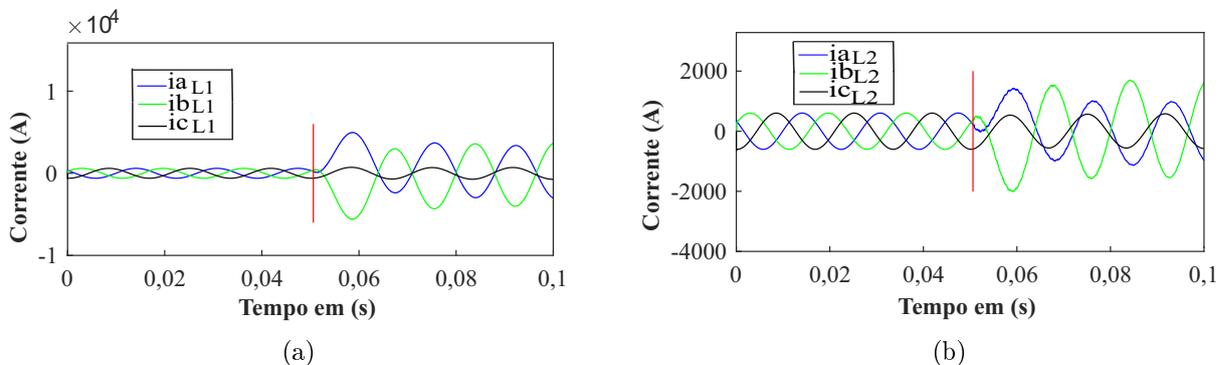


Figura 5.15. Correntes de fase medidas (Caso 4): (a) na LT 1 (b) na LT 2.

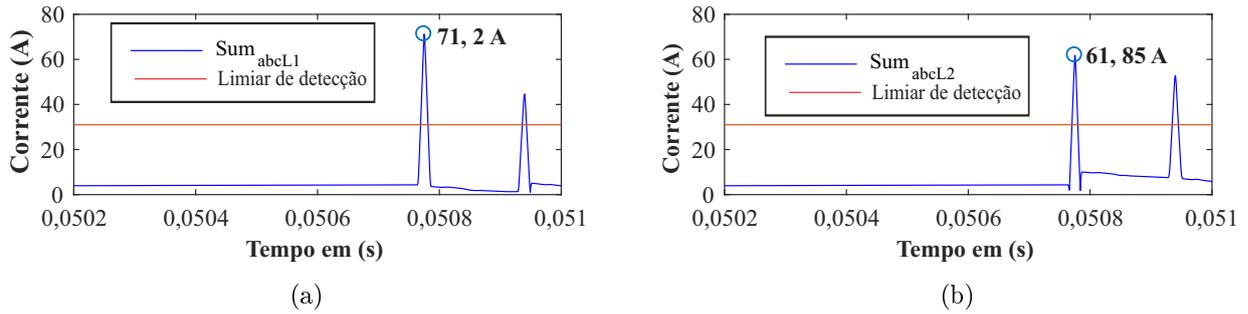


Figura 5.16. Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 4): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2} .

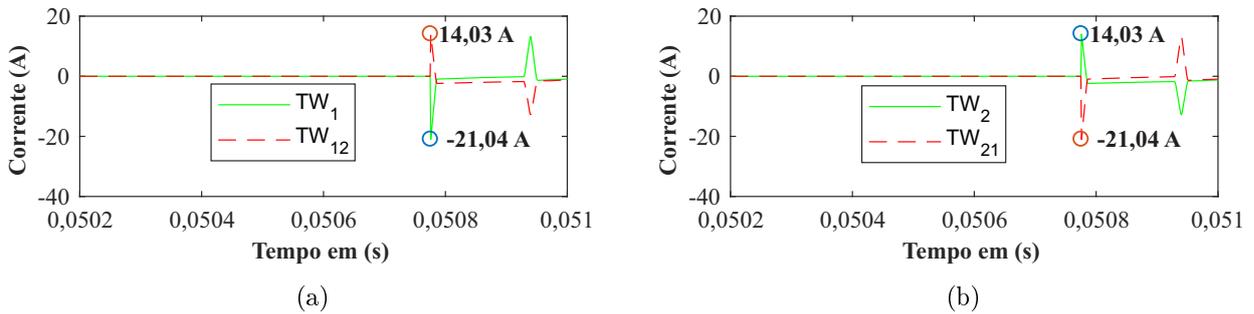


Figura 5.17. OVs mais significativas (Caso 4): (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21} .

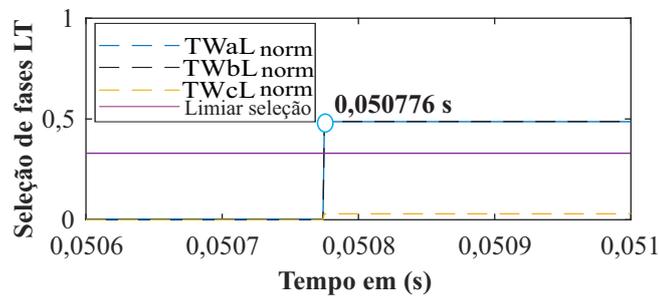


Figura 5.18. Critério de seleção de fases para faltas clássicas (Caso 4).

Analisando-se a Figura 5.16, percebe-se que os dois sinais Sum_{abcL1} e Sum_{abcL2} indicam a ocorrência de um distúrbio, pois ambos excedem o limiar de detecção. Desta forma, as quatro OVs mais significativas TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} são determinadas, sendo estas ilustradas na Figura 5.17. Aplicando-se as condições de operação aos referidos sinais, tem-se o conjunto de inequações a seguir:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 21,04 - 14,03 > 0,03 \cdot (21,04 + 14,03)$$

$$7,01 > 1,0521? \text{ Sim} \Rightarrow \text{falta na LT 1 do circuito duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 14,03 - 21,04 > 0,03 \cdot (21,04 + 14,03)$$

$$-7,01 > 1,0521? \text{ Não} \Rightarrow \text{não houve falta na LT 2 do circuito duplo}$$

Conforme esperado, o algoritmo identifica o curto-circuito como sendo interno à LT 1 do circuito duplo. A Figura 5.18 representa a aplicação dos critérios para seleção de faltas clássicas, na qual demonstra-se que o algoritmo identificou corretamente as fases A e B como sendo as fases defeituosas. Por conta disto a proteção emitiu um trip tripolar na LT 1 do circuito duplo rapidamente em **0,050776 s**. De fato, nesse exemplo, a proteção atuou para eliminar o defeito em $176 \mu\text{s}$, tempo este correspondente à subtração do instante de detecção da falta (**0,050776 s**) pelo instante de ocorrência do defeito (**0,0506 s**).

5.2.5 Simulação Pontual 5: Curto-Circuito Externo C-T, no Ponto L4F3 com Ângulo de Incidência de 45°

Nesse caso, simulou-se um curto monofásico C-T ($R_{terra} = 10 \Omega$) em **0,0506 s**, localizado no ponto L4F3, à jusante do terminal remoto conforme representado na Figura 4.3, considerando um ângulo de incidência de 45° . Essa situação caracteriza um curto-circuito externo à LT de circuito duplo monitorada, servindo para demonstrar a segurança do algoritmo proposto. Os sinais de corrente medidos nas LTs 1 e 2 são dados na Figura 5.19, ilustrando nas Figuras 5.20 e 5.21 os resultados obtidos na simulação.

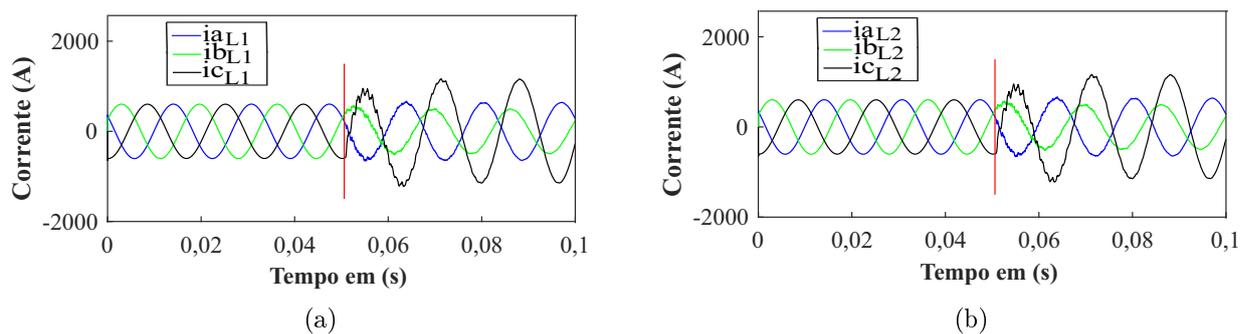


Figura 5.19. Correntes de fase medidas (Caso 5): (a) na LT 1 (b) na LT 2.

Analisando a Figura 5.20, percebe-se que os dois sinais Sum_{abcL1} e Sum_{abcL2} são calculados de modo que ambos excedem o limiar de detecção das OV, identificando a presença de uma perturbação na rede elétrica.

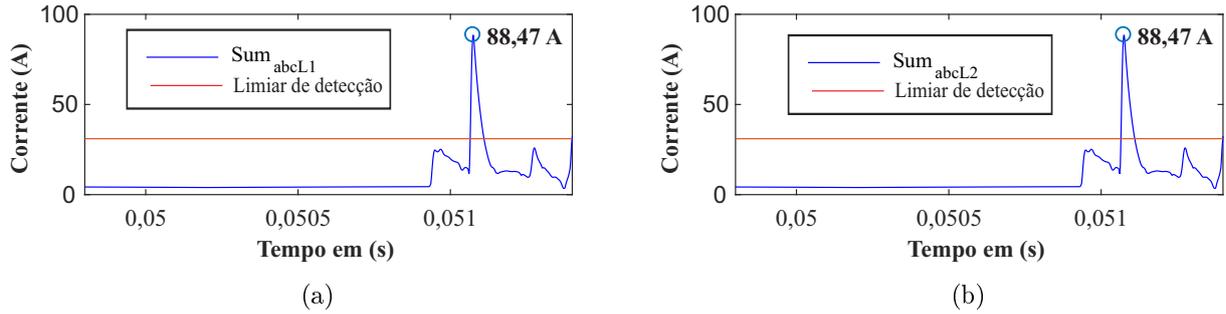


Figura 5.20. Sinais medidos nas LTs de circuito duplo (Caso 5): (a) Sum_{abcL1} (b) Sum_{abcL2} .

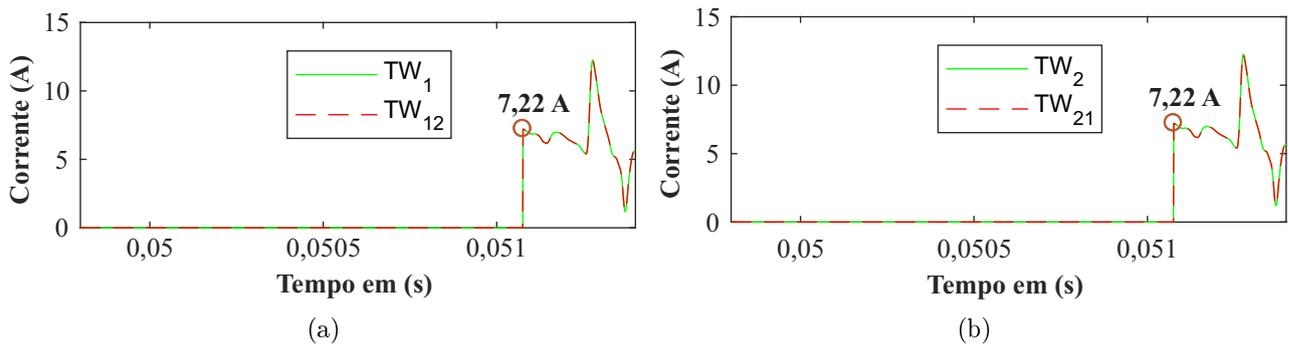


Figura 5.21. OV's mais significativas (Caso 5): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21} .

De acordo com a Figura 5.21, as quatro OV's mais significativas TW_1 , TW_{12} , TW_2 e TW_{21} obtidas são representadas e então, aplicando-se as condições de operação nas LTs do circuito duplo, tem-se o conjunto de inequações a seguir:

$$|TW_1| - |TW_{12}| > k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|) \Rightarrow 7,22 - 7,22 > 0,03 \cdot (7,22 + 7,22)$$

$$0 > 4,332? \text{ Não} \Rightarrow \text{n\~{o} houve falta na LT 1 do circuito duplo}$$

$$|TW_2| - |TW_{21}| > k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|) \Rightarrow 7,22 - 7,22 > 0,03 \cdot (7,22 + 7,22)$$

$$0 > 4,332? \text{ Não} \Rightarrow \text{n\~{o} houve falta na LT 2 do circuito duplo}$$

Desta forma, o algoritmo identifica o curto-circuito como sendo externo ao circuito duplo, pois nenhuma das condições foi satisfeita. Assim, neste cenário, o sistema de proteção restringe sua operação, conforme esperado.

5.3 SIMULAÇÕES EM MASSA

Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo de proteção proposto em situações mais críticas de faltas inter-circuitos, utilizou-se a metodologia das simulações em massa. Esta

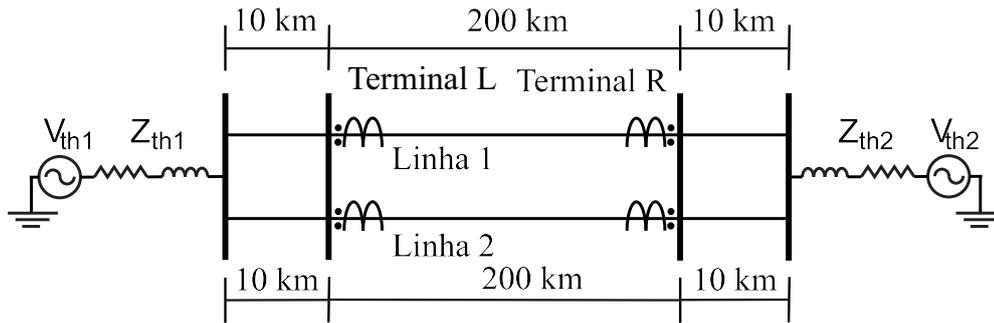


Figura 5.22. Sistema de transmissão teste para simulações em massa

técnica de simulação consiste em simular um elevado número de casos com variações incrementais de um determinado parâmetro de falta ou do sistema, tornando possível analisar de forma detalhada a influência de diversos fatores sobre o desempenho da proteção. Além disso, torna-se possível verificar os limites de sensibilidade da proteção em questão, o que viabiliza identificar boas práticas de ajustes para a montagem de um esquema de proteção seguro e confiável.

Para as análises em massa do algoritmo de proteção desenvolvido, realizaram-se simulações de faltas inter-circuitos em um sistema teste de transmissão fictício de 500 kV/60 Hz, o qual é ilustrado na Figura 5.22 e foi modelado e simulado pelo próprio autor. O sistema é composto por LTs modeladas a parâmetros distribuídos e constantes na frequência, perfeitamente transposta, sendo os SEEs adjacentes ao sistema de transmissão modelados por meio de circuitos equivalentes de Thévenin. Os parâmetros do sistema teste e de variáveis fixas de simulação são descritos nas Tabelas 5.1 e Tabela 5.2, respectivamente.

Analisando o SEE representado na Figura 5.22, nota-se que cada barra monitorada possui

Tabela 5.1. Tabela contendo os parâmetros do Sistema teste.

Parâmetro	Valores
Z_{th1}	$Z_1 = 1,38 + j12,02 \Omega$ $Z_0 = 16,71 + j60,95 \Omega$
V_{th1}	$500/90^\circ$ kV
Z_{th2}	$Z_1 = 1,38 + j12,02 \Omega$ $Z_0 = 16,71 + j60,95 \Omega$
V_{th2}	$490/75^\circ$ kV
Linhas de Transmissão	$Z_1 = 0,0346 + j0,3005 \Omega/km$ $Y_1 = 5,5106 \mu S/km$ $Z_0 = 0,4177 + j1,5238 \Omega/km$ $Y_0 = 2,8648 \mu S/km$

Tabela 5.2. Parâmetros adotados nas simulações em massa.

Parâmetro	Valores
Frequência de Amostragem (f_s)	1 MHz
Frequência do Filtro Anti-Aliasing (f_c)	400 kHz
Janela de Coeficientes do Filtro DS (T_{DS})	20 μ s
Limiar de detecção das OV's (Lim_L)	31 A
Coeficiente de Operação (k_{OV})	0,30

quatro LTs conectadas, de modo que para uma OV que se propaga em uma das linhas da rede elétrica, ao incidir em um dado terminal, esta OV verá à sua frente três LTs, de modo que a frente de onda se dividirá em parcelas menores do que as verificadas no SEE analisado anteriormente nos casos pontuais. De fato, aplicando-se a regra do divisor de corrente nas OV's analisadas, percebe-se que apenas uma pequena parcela da amplitude da OV incidente ao terminal monitorado proveniente da LT com falta sofre refração na LT sã, possibilitando que o coeficiente de operação k_{OV} no sistema assuma valores maiores quando comparado ao sistema da Figura 4.3. Portanto, para conferir confiabilidade e segurança ao esquema de proteção durante as simulações em massa, optou-se pelo uso de um valor $k_{OV} = 0,3$.

Durante as simulações em massa, quatro cenários de faltas inter-circuitos foram avaliados, variando dentro de um determinado intervalo de tempo somente um parâmetro de falta por vez, enquanto os demais permanecem constantes. Os quatro cenários de simulação em massa são descritos na Tabela 5.3, ressaltando-se que todas as faltas foram simuladas considerando um ângulo de incidência de 90° , por ser o cenário mais comum. Ademais, destaca-se que como valores default, foram assumidos os seguintes parâmetros: Distância de falta $d = 90\%$, $SIR=0,2$, resistência de falta $R_f = 10 \Omega$, e comprimento das LTs como sendo $l = 200$ km.

Tabela 5.3. Lista de casos utilizados nas simulações em massa.

Casos	Tipo de Falta	Posição da Falta	SIR	R_f (p/ terra ou entre fases)	Comprimento LTs
1	$A_1B_2 - T$	0,5% a 99%	SIR_1 e $SIR_2=0,2$	10 Ω	200 km
2	A_1B_2	90%	$SIR_1 : 0,2$ a 10	10 Ω	200 km
3	$A_1B_2 - T$	90%	SIR_1 e $SIR_2 = 0,2$	0 a 100 Ω	200 km
4	A_1B_2	90%	SIR_1 e $SIR_2 = 0,2$	10 Ω	40 km a 200 km

5.3.1 Simulação em Massa 1: Curto-circuito $A_1B_2 - T$ aplicado de 0,5% a 99% do Comprimento da LT com $R_{terra} = 10 \Omega$ e $R_{F_1F_2} = 0 \Omega$

Nessa primeira análise, avaliou-se o efeito da posição do defeito no desempenho do sistema de proteção proposto. Ao se realizar variações incrementais em um determinado parâmetro de falta, é possível ter uma ideia das vantagens e limitações do método de proteção para diversos cenários de falta.

A localização do curto-circuito foi variada de 0,5% a 99% dos comprimentos totais das LTs de 200 km, com variações incrementais de 0,5%. Assim, cada um dos pontos representados nos gráficos corresponderão a uma diferente localização do defeito no sistema. A Figura 5.23(a) apresenta as OVs de loop mais significativas TW_1 e TW_{12} , ao passo que a Figura 5.23(b) apresenta as OVs de loop mais significativas TW_2 e TW_{21} . Estas OVs de loop evidenciam a ocorrência de faltas inter-circuitos, as quais foram detectadas pela proteção em todos os casos. De fato, a ocorrência de faltas inter-circuitos pode ser comprovada quando se avaliam as condições de operação da proteção diferencial cruzada para ambas as LTs do circuito, as quais são dadas pelas inequações (4.7) e (4.8), sendo os resultados apresentados nas Figuras 5.24(a) e 5.24(b), respectivamente.

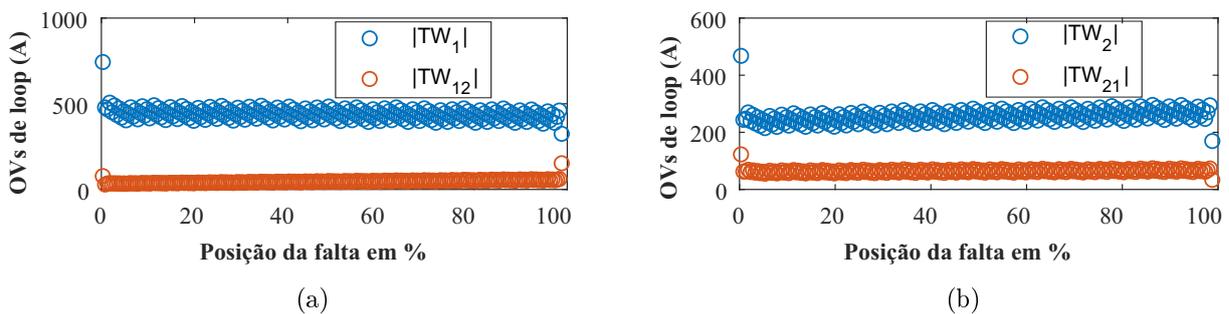


Figura 5.23. OVs mais significativas (Caso 1 simulação em massa): (a) TW_1 e TW_{12} (b) TW_2 e TW_{21} .

Na Figura 5.24(a), percebe-se que o coeficiente de operação na LT 1 do circuito duplo ($|TW_1| - |TW_{12}|$) excede o coeficiente de restrição na LT 1 do circuito duplo ($k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|)$) e de semelhante modo, na Figura 5.24(b), o coeficiente de operação na LT 2 do circuito duplo ($|TW_2| - |TW_{21}|$) excede o coeficiente de restrição na LT 2 do circuito duplo

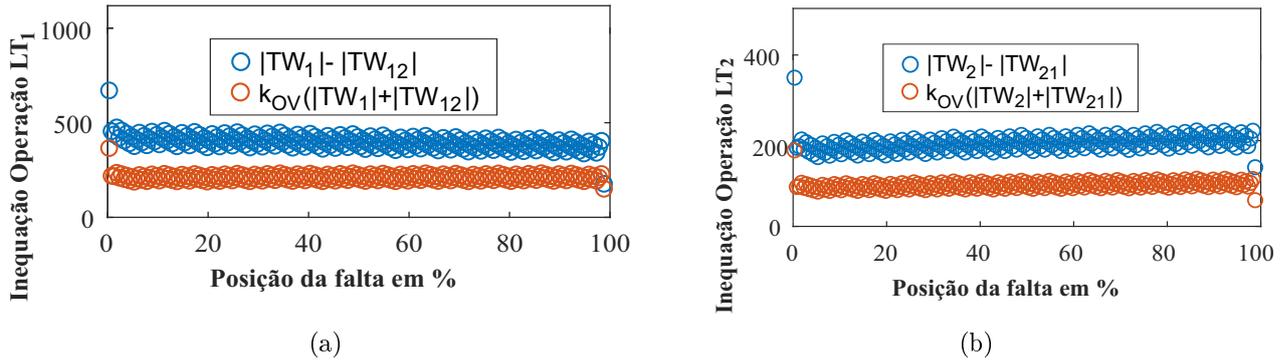


Figura 5.24. Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 1): (a) LT 1 (b)LT 2.

($k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|)$), de sorte que o algoritmo identifica a falta como sendo inter-circuitos para todas as posições de falta simuladas, confirmando o resultado esperado.

Uma vez que o algoritmo de proteção identificou os defeitos inter-circuitos, este passa a aplicar os critérios de seleção das fases, os quais são baseados nas expressões de (4.16) a (4.23) demonstradas anteriormente. Na Figura 5.25(a) e na Figura 5.25(b) são apresentados os critérios de seleção de fases para faltas inter-circuitos.

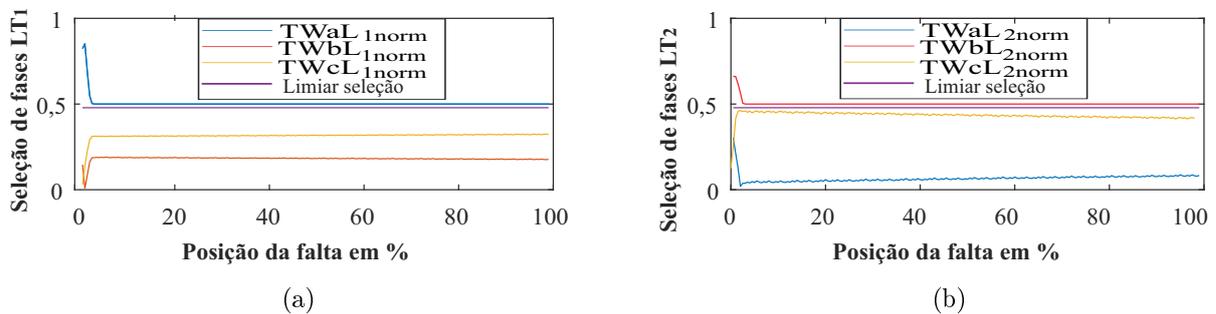


Figura 5.25. Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 1): (a) LT 1 (b)LT 2.

Na Figura 5.25(a), a linha horizontal na cor roxa corresponde ao limiar de seleção de fases para faltas inter-circuitos, ao passo que os sinais $TW_{aL1norm}$, $TW_{bL1norm}$ e $TW_{cL1norm}$ correspondem às expressões do lado esquerdo das inequações (4.18), (4.19) e (4.20), respectivamente. Nesta Figura pode ser visto que somente o $TW_{aL1norm}$ excede o limiar pré-estabelecido. Por outro lado, na Figura 5.25(b), percebe-se que somente o $TW_{bL2norm}$ excede o limiar pré-estabelecido. O algoritmo de proteção, posteriormente, opta por *trips* tripolares em cada uma das LTs que constituem o circuito duplo.

O algoritmo identifica desta forma para diversas localizações de falta as fases defeituosas com precisão, operando conforme o esperado para todos os cenários de defeito simulados. Na

Figura 5.26, tem-se o tempo de operação da proteção para diferentes locais de falta, onde o gráfico apresenta a forma de uma reta com inclinação positiva. Isto ocorre porque à medida que o local da falta se afasta do terminal monitorado, a proteção leva mais tempo para atuar, pois as OV's demoram mais para chegar ao terminal monitorado. Por isso, o algoritmo leva mais tempo para detectar os primeiros picos das OV's, atrasando o *trip* da proteção. Entretanto, os tempos máximos de atuação para as LTs de 200 km modeladas não ultrapassaram a ordem de **0,69 ms**, evidenciando a elevada velocidade de operação da função proposta.

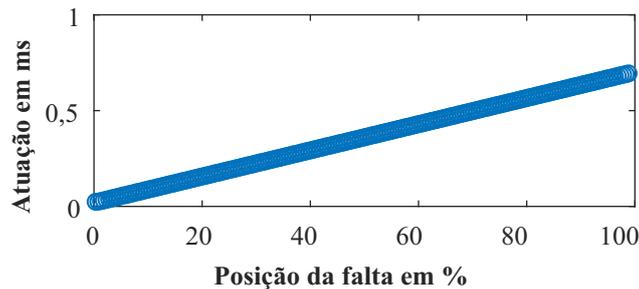


Figura 5.26. Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 1).

5.3.2 Simulação em Massa 2: Curto-circuito A_1B_2 com Valor do SIR_1 Variando de 0,2 a 10 com $R_{terra} = 10^{12} \Omega$ e $2 \cdot R_{F1F2} = 10 \Omega$

Nesse segundo caso, avaliou-se o efeito da variação do SIR_1 (*Source Impedance Ratio*) no terminal local, enquanto o SIR_2 do terminal remoto permaneceu constante em **0,2**. Os demais parâmetros foram ajustados com os valores default, conforme explicado anteriormente. O objetivo desta simulação consiste em avaliar o desempenho da proteção quando os SIRs são consideravelmente diferentes entre si, ou seja, existe uma fonte fraca e outra forte. Sabe-se que na proteção diferencial cruzada no domínio fasorial, a presença de valores diferentes de SIRs conectados em cada uma das fontes do SEE podem degradar o desempenho da proteção. Sobretudo quando a falta ocorre próximo a um terminal ligado à fonte com alto valor de SIR, situação em que a proteção pode não identificar o defeito e não atuar para eliminá-la tão logo ela ocorra Wang *et al.* (2005a).

A variável SIR_1 sofreu variações de 0,2 a 10 com variações incrementais de 0,01. Assim, cada um dos pontos representados nos gráficos corresponderão a um diferente valor de SIR_1 na fonte do lado da barra local. A Figura 5.27(a) apresenta as OV's de loop mais significativas

TW_1 e TW_{12} , ao passo que a Figura 5.27(b) apresenta as OVs de loop mais significativos TW_2 e TW_{21} . Ao avaliar os resultados, nota-se que as OVs de loop detectam a ocorrência de faltas inter-circuitos para todos os valores de SIR_1 avaliados. A ocorrência de faltas inter-circuitos podem ser comprovadas quando se avaliam as condições de operação da proteção diferencial cruzada para ambas as LTs do circuito, conforme apresentado nas Figuras 5.28(a) e 5.28(b).

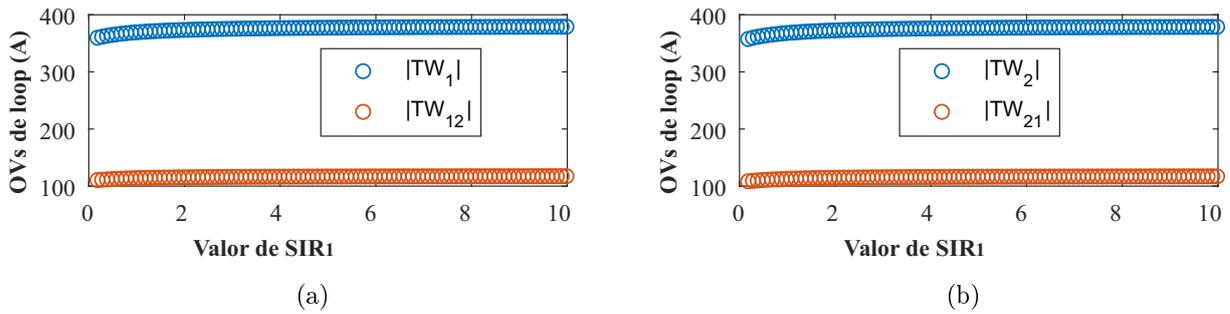


Figura 5.27. OVs mais significativas (Caso 2 simulação em massa): (a) $TW_1 \times TW_{12}$ (b) $TW_2 \times TW_{21}$.

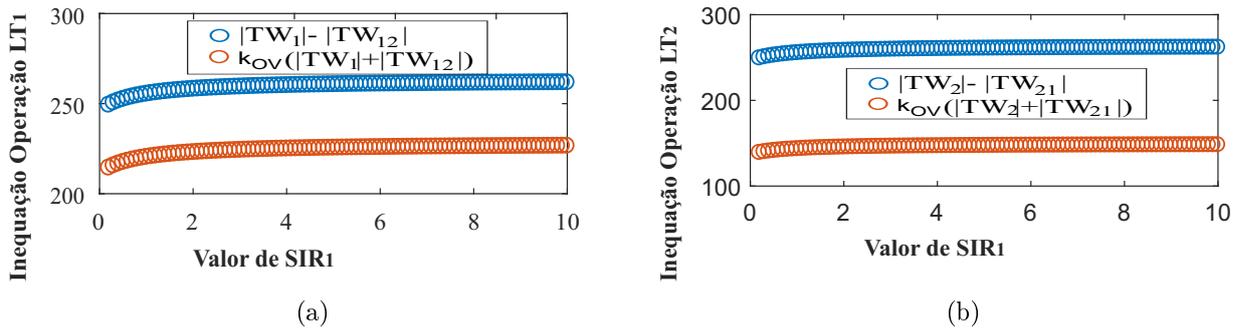


Figura 5.28. Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 2): (a) LT 1 (b) LT 2.

Na Figura 5.28(a), pode se perceber que o coeficiente de operação na LT 1 do circuito duplo $|TW_1| - |TW_{12}|$ excede o coeficiente de restrição na LT 1 do circuito duplo $k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|)$ e de semelhante modo, na Figura 5.28(b), o coeficiente de operação na LT 2 do circuito duplo $|TW_2| - |TW_{21}|$ excede o coeficiente de restrição na LT 2 do circuito duplo $k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|)$, de sorte que o algoritmo identifica a falta como sendo inter-circuitos em todos os casos simulados. Assim, ao aplicar os critérios de seleção das fases, conforme ilustrado nas Figuras 5.29(a) e 5.29(b), as fases com falta são também identificadas corretamente.

Na Figura 5.29(a), nota-se que somente o sinal $TW a L_{1norm}$ excede o limiar pré-estabelecido. Adicionalmente, na Figura 5.29(b), observa-se que somente o $TW b L_{2norm}$ excede o limiar para seleção de fases. O algoritmo de proteção, depois, opta por *trips* tripolares em cada umas das

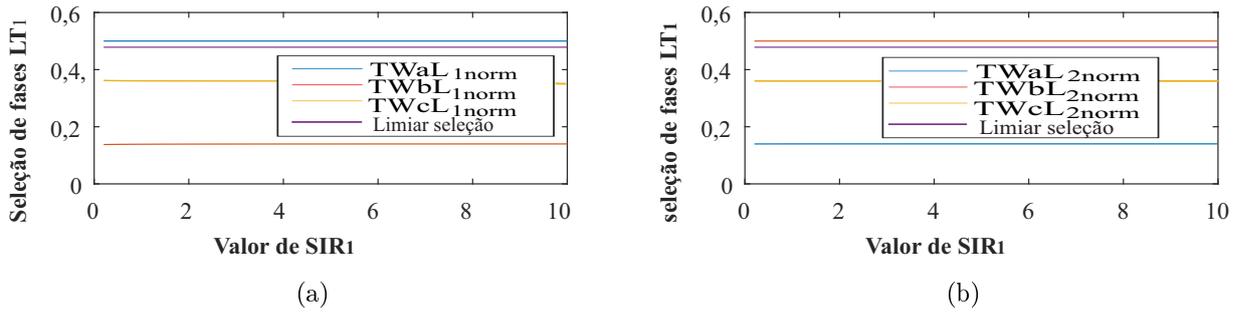


Figura 5.29. Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 2): (a) LT 1 (b)LT 2.

LTs que constituem o circuito duplo. Portanto, pode-se dizer que o algoritmo identificou as faltas inter-circuitos e realizou a seleção de fase defeituosas com precisão para todas as variações de SIR_1 simuladas, operando conforme o esperado para todos os cenários de defeito simulados.

Na Figura 5.30, tem-se o tempo de operação da proteção para diferentes valores de SIR_1 , onde o gráfico apresenta a forma de uma reta com valor constante. Para esses cenários, os tempos de atuação da proteção apresentaram valores sempre próximos a **0,63 ms**.

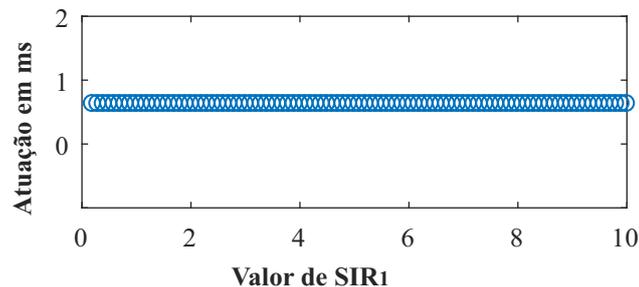


Figura 5.30. Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 2).

5.3.3 Simulação em Massa 3: Curto-circuito $A_1B_2 - T$ com Impedância para a Terra Variando de 0Ω a 100Ω e $R_{F1F2} = 0 \Omega$

Nesse caso, avaliou-se o efeito das variações dos valores de R_f no desempenho do sistema de proteção proposto em situações críticas de faltas inter-circuitos. De fato, essa análise permite um estudo de sensibilidade importante no âmbito da proteção baseada em OV, visto que a detecção de faltas com valores de R_f elevados é um grande desafio. Assim, o valor de R_f foi variado de 0Ω a 100Ω , com variações incrementais de 1Ω de uma simulação para a outra. Desse modo, cada um dos pontos representados nos gráficos apresentados correspondem a diferentes

valores de resistência de falta.

A Figura 5.31(a) apresenta as OV's de loop mais significativas TW_1 e TW_{12} , ao passo que a Figura 5.31(b) apresenta as OV's de loop mais significativas TW_2 e TW_{21} . Analisando as Figuras 5.32(a) e 5.32(b), percebe-se que as faltas inter-circuitos foram devidamente detectadas em ambos os circuitos. Na Figura 5.32(a), pode se perceber que o coeficiente de operação na LT 1 do circuito duplo $|TW_1| - |TW_{12}|$ excede o coeficiente de restrição na LT 1 do circuito duplo $k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|)$ e de semelhante modo, na Figura 5.32(b), o coeficiente de operação na LT 2 do circuito duplo $|TW_2| - |TW_{21}|$ excede o coeficiente de restrição na LT 2 do circuito duplo $k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|)$. Portanto, o algoritmo identifica a falta como sendo inter-circuitos para todos os valores de R_f simulados.

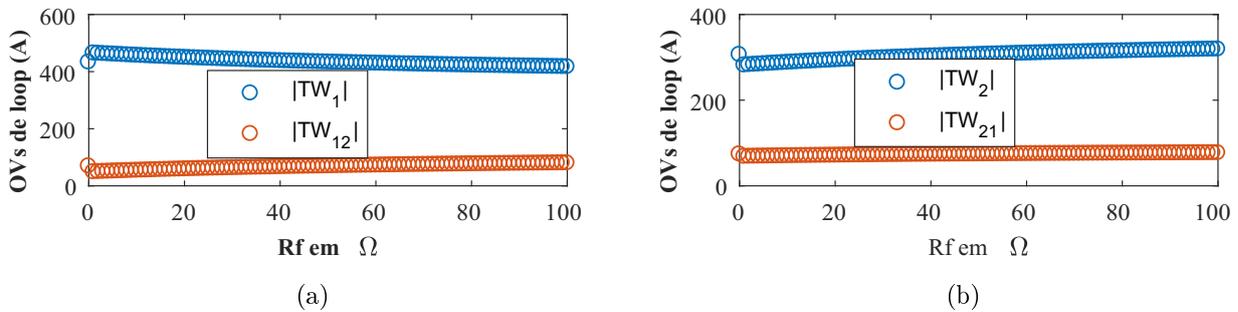


Figura 5.31. OV's mais significativas (Caso 3 simulação em massa): (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21} .

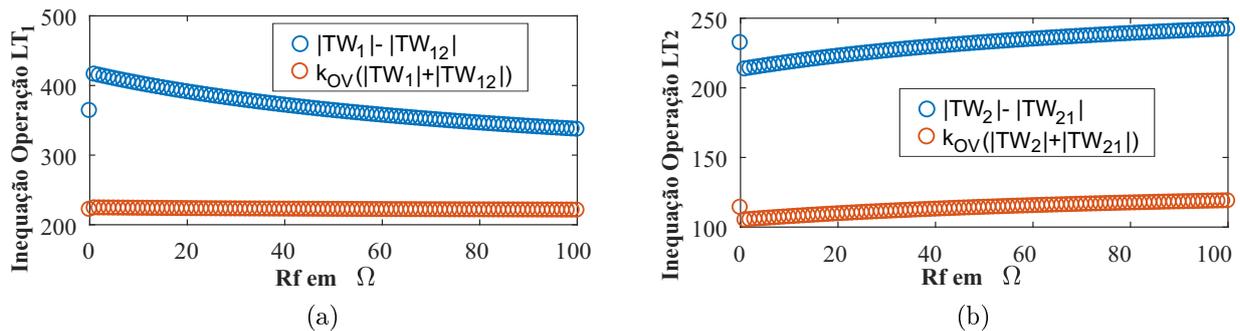


Figura 5.32. Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 3): (a) LT 1 (b) LT 2.

Uma vez identificadas as faltas inter-circuitos, em cada caso, realiza-se o processo de seleção das fases com falta. Na Figura 5.33(a) e na Figura 5.33(b) são apresentados os critérios de seleção de fases para faltas inter-circuitos, os quais permitirão facilitar e ilustrar o funcionamento do algoritmo.

Na Figura 5.33(a), pode ser visto que somente o sinal $TW a L_{1norm}$ excede o limiar. De

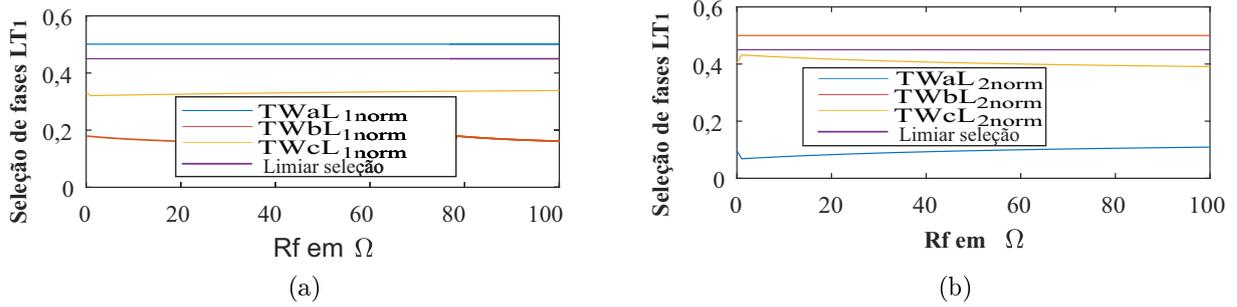


Figura 5.33. Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 3): (a) LT 1 (b)LT 2

semelhante modo, na Figura 5.33(b), pode ser percebido que somente o $TWbL_{2norm}$ excede o limiar para seleção de fases. Posteriormente, o algoritmo de proteção opta por *trips* tripolares em ambas as LTs do circuito duplo. Assim, o algoritmo implementado identifica as faltas intercircuitos detectando corretamente as fases defeituosas em todos os casos simulados. Embora o aumento da resistência de falta seja um problema para todos os métodos baseados em OV, o algoritmo proposto se mostrou robusto para as variações de R_f simuladas. Na Figura 5.34, tem-se o tempo de operação da proteção para diferentes valores de R_f , onde o gráfico apresenta a forma de uma reta com valor constante. Isto ocorre porque as faltas simuladas nessa simulação em massa foram ajustadas para ocorrer em apenas um local das LTs (em 90%), de modo que tempos de operação de aproximadamente **0,63 ms** foram verificados em todos os casos.

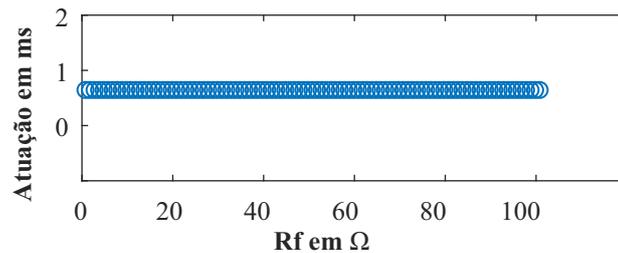


Figura 5.34. Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 3).

5.3.4 Simulação em Massa 4: Curto-circuito A_1B_2 com Comprimento das LTs Variando de 40 km a 200 km com $R_{terra} = 10^{12} \Omega$ e $2 \cdot R_{F1F2} = 10 \Omega$

Nessa última simulação em massa, avaliou-se o efeito das variações dos comprimentos de ambas as LTs que compõem o circuito duplo no desempenho do sistema de proteção proposto. O

comprimento das LTs é um fator que afeta diretamente o desempenho de proteções baseadas em OV, pois quão menores forem os comprimento das LTs associadas, maiores serão as frequências dominantes dos transitórios induzidos pelas faltas, exigindo necessidade de maiores frequências de amostragem no sinal de corrente a ser avaliado, o que torna mais difícil a identificação das frentes de onda de interesse (V.LOPES *et al.*, 2014). O valor dos comprimentos de ambas as LTs de circuito duplo foram variados de 40 km a 200 km com variações incrementais de 1 km de uma simulação para a outra, de sorte que a posição da falta, em km, fosse a mesma para ambos os circuitos avaliados. Assim, cada um dos pontos representados nos gráficos a seguir corresponderão a diferentes valores de comprimentos de LTs.

A Figura 5.35(a) apresenta as OVs de loop mais significativas TW_1 e TW_{12} , e a Figura 5.35(b) apresenta as OVs de loop mais significativas TW_2 e TW_{21} . Avaliando as condições de operação da proteção diferencial cruzada para ambas as LTs do circuito, verifica-se a ocorrência de faltas inter-circuitos, conforme ilustrado nas Figuras 5.36(a) e 5.36(b).

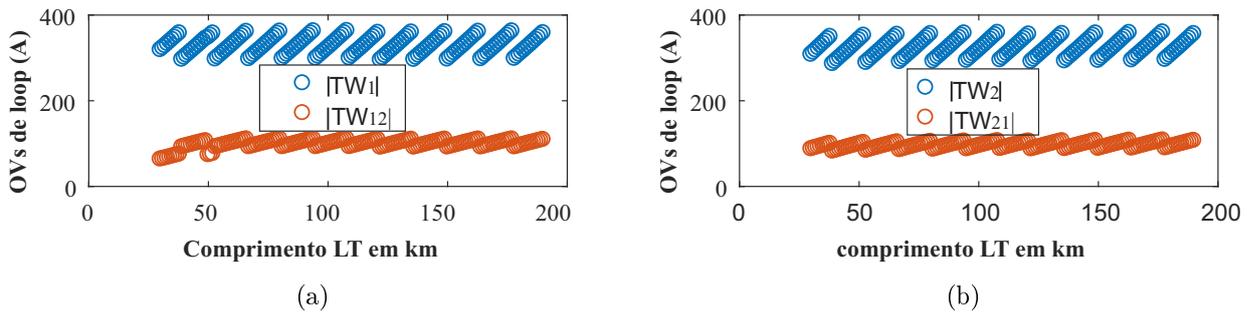


Figura 5.35. OVs mais significativas (Caso 4 simulação em massa) : (a) TW_1 x TW_{12} (b) TW_2 x TW_{21} .

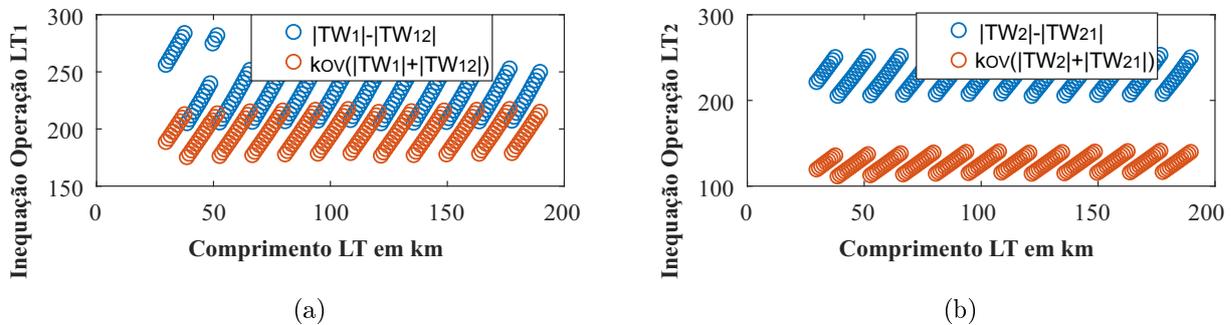


Figura 5.36. Condições de Operação das LTs de circuito duplo (Caso 4): (a) LT 1 (b) LT 2.

Pela Figura 5.36(a), pode se perceber que o coeficiente de operação na LT 1 do circuito duplo $|TW_1| - |TW_{12}|$ é sempre maior que o coeficiente de restrição na LT 1 do circuito duplo

$k_{OV} \cdot (|TW_1| + |TW_{12}|)$ para todos os casos analisados e de semelhante modo, na Figura 5.36(b), o coeficiente de operação na LT 2 do circuito duplo $|TW_2| - |TW_{21}|$ também é sempre maior que o coeficiente de restrição na LT 2 do circuito duplo $k_{OV} \cdot (|TW_2| + |TW_{21}|)$. Assim o algoritmo identifica a falta como sendo inter-circuitos para todos os comprimentos das LTs simulados.

Aplicando os critérios de seleção das fases defeituosas, conforme evidenciado nas Figuras 5.37(a) e 5.37(b), somente o sinal $TW_{aL1norm}$ excede o limiar para a análise da LT 1, enquanto que pode ser percebido que somente o $TW_{bL2norm}$ excede o limiar para seleção de fases na LT 2. Desta forma, o algoritmo de proteção opta por *trips* tripolares em ambos os circuitos.

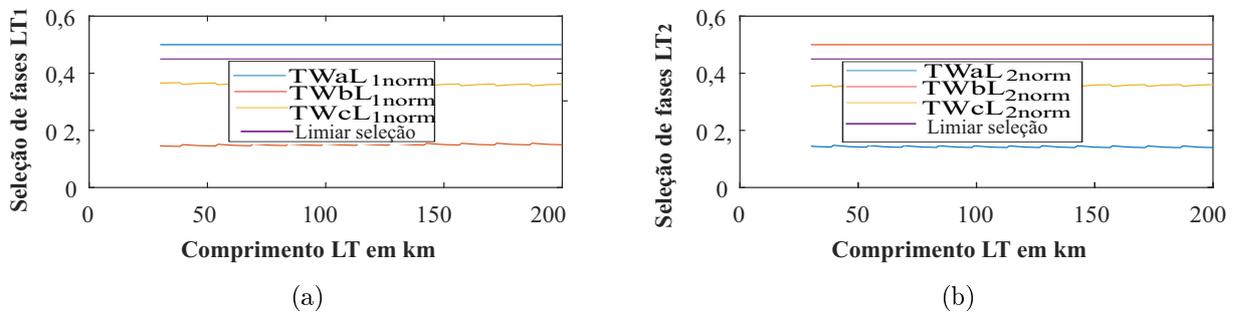


Figura 5.37. Seleção de fases defeituosas nas LTs de circuito duplo (Caso 4): (a) LT 1 (b) LT 2

Destaca-se que o algoritmo identifica corretamente as faltas inter-circuitos em situações de LTs curtas e longas, sem perda de precisão na identificação das fases defeituosas. Na Figura 5.38, tem-se o tempo de operação da proteção para diferentes locais de falta, onde o gráfico apresenta forma de uma reta com inclinação positiva. Tal comportamento dos tempos de operação já era esperado, visto que ao aumentar o comprimento das LTs, a distância absoluta do defeito, em quilômetros, em relação ao terminal local também aumenta e por consequência a proteção leva mais tempo para detectar o defeito. De fato, as OVs lançadas na LT pela falta demoram mais para chegar ao terminal monitorado, atrasando a atuação da proteção nos casos avaliados. Por isso, conclui-se que quão maiores os comprimentos das LTs monitoradas, maiores os tempos de atuação esperados para faltas mais distantes do terminal de referência. Mesmo assim, os tempos de atuação para os comprimentos das LTs simulados variaram de **0,14 ms** a **0,63 ms** apenas, provando a capacidade de atuação rápida da proteção proposta, mesmo em situações críticas de faltas inter-circuitos.

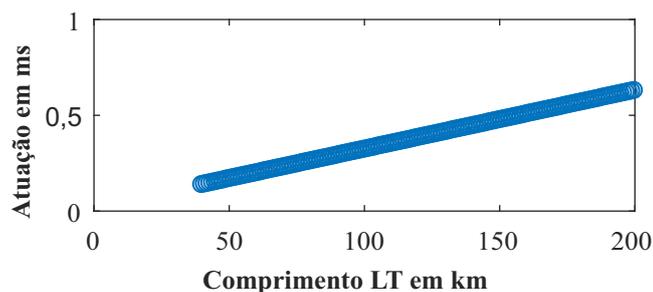


Figura 5.38. Tempo de atuação em ms para o algoritmo de proteção (Caso 4).

5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, diversas simulações foram realizadas e avaliaram-se vários cenários de falta com o objetivo de validar o método de proteção proposto. Simulações pontuais e em massa foram realizadas para demonstrar a confiabilidade e segurança da proteção desenvolvida frente a casos de faltas clássicas e inter-circuitos.

As simulações pontuais consistiram em aplicar um determinado tipo de curto-circuito em um ponto específico das LTs de circuito duplo e na verificação da resposta da proteção na eliminação deste defeito. Para se obter os resultados destes casos pontuais, tomou-se como referência o sistema teste proposto em IEEE PSRC (2004). Dos testes, ficou evidenciado que o método proposto é capaz de detectar e eliminar defeitos rapidamente para diversos tipos de faltas, quando se variam a localização da falta, a LT onde o defeito ocorreu, ângulo de incidência, entre outros fatores.

Para o caso das simulações em massa, o SEE modelado foi um sistema fictício representado na Figura 5.22, o qual foi modelado pelo próprio autor. O objetivo das simulações em massa foi demonstrar a confiabilidade do algoritmo proposto, mesmo durante situações adversas de faltas inter-circuitos. Em cada grupo de simulações, foram variados parâmetros de falta e do sistema, permitindo a realização de uma análise importante do ponto de vista da sensibilidade da proteção.

Em todos os casos simulados, a proteção desenvolvida demonstrou ser promissora, sendo capaz de identificar a presença de curtos clássicos ou inter-circuitos em tempos da ordem de 1 ms para os sistemas simulados, sem perda de precisão no processo de identificação das fases com defeitos.

CONCLUSÃO E PROPOSTAS

Este trabalho apresentou uma análise da proteção diferencial cruzada em LTs de circuito duplo no domínio das OV's. O método desenvolvido foi mapeado a partir da proteção diferencial cruzada baseada em grandezas fundamentais fasoriais, visando obter uma solução de proteção com maior velocidade de atuação, mas sem perder a confiabilidade e segurança. Esse tipo de proteção tem ganhado espaço no mercado, pois é capaz de prover proteção em grande percentual da linha usando apenas dados de um terminal, eliminando a obrigatoriedade de canais de comunicação.

Vários cenários de falta foram simulados usando o *ATP*, os quais incluem variações na localização do defeito, das impedâncias de falta, dos ângulos de incidência, SIR, resistência de falta e comprimento das LTs monitoradas. Dentre essas simulações, foram realizados testes pontuais e em massa, nos quais foram contempladas situações de faltas clássicas e inter-circuitos. No primeiro bloco de simulações (pontuais), consideraram-se vários tipos de falta aplicados em pontos específicos das LTs de circuito duplo e verificou-se a resposta no tempo da proteção na eliminação destes defeitos. Por outro lado, no segundo bloco de simulações (em massa), foram simulados quatro tipos diferentes de faltas inter-circuitos, que consistem em situações mais adversas, nos quais diferentes parâmetros de falta e do sistema foram variados.

Em todos os cenários avaliados nessa dissertação, considerando os sistemas modelados, a proteção diferencial cruzada proposta apresentou bons resultados, sendo capaz de detectar faltas clássicas e inter-circuitos em tempos da ordem de 1ms. Ademais, em todas as situações testadas, o processo de seleção de fases com faltas também foi realizado com sucesso, permitindo a rápida indicação das fases defeituosas nas LTs modeladas. Desse modo, verificou-se que o método é seguro e possui boa confiabilidade quando as duas LTs estão em funcionamento, sendo, portanto, uma boa alternativa para acelerar as atuações de esquemas de proteção fasoriais tradicionais em sistemas de transmissão que operam próximos aos limites de estabilidade.

Para trabalhos futuros, é possível destacar alguns pontos que ainda merecem atenção especial, tais como:

- Desenvolver um método de seleção de fases que permita identificar faltas inter-circuitos que envolvam as mesmas fases em ambas as LTs de circuito duplo.
- Verificar a resposta do sistema de proteção para LTs com compensação série.
- Analisar o desempenho da proteção para LTs de circuito duplo compostas por circuitos com diferentes parâmetros elétricos, situação comumente verificada no sistema elétrico, em função de torres com configurações distintas ou da utilização de cabos diferentes em cada circuito.
- Verificar a atuação da proteção para faltas evolutivas.
- Adaptar o algoritmo de proteção quando as LTs constituintes do circuito duplo possuem comprimentos diferentes sobretudo no caso de faltas externas à jusante do terminal remoto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999. Citado na página 16.
- APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D.; SAMBASIVAN, S.; RICHARDS, S. Protection of double circuit transmission lines. In: *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 85–101. Citado 5 vezes nas páginas 3, 4, 6, 31, and 32.
- BOLLEN, M. H. J. Travelling-wave-based protection of double-circuit lines. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 140, n. 1, p. 37–47, Jan 1993. ISSN 0143-7046. Citado na página 16.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D.; SILVA, K. M. Transformada wavelet discreta aplicada ao diagnóstico de distúrbios. p. 6, 08 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 and 22.
- DESHPANDE, A. S.; SHAH, G. S. Transmission line protection based on travelling waves. *WSEAS Trans. Cir. and Sys.*, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Stevens Point, Wisconsin, USA, v. 10, n. 12, p. 423–441, dez. 2011. ISSN 1109-2734. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2189895.2189898>>. Citado na página 16.
- DING, J.; LI, L.; ZHENG, Y.; ZHAO, C.; CHEN, H.; WANG, X. Distributed travelling-wave-based fault location without time synchronisation and wave velocity error. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 11, n. 8, p. 2085–2093, 2017. ISSN 1751-8687. Citado na página 15.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solutions of electromagnetic transients in single and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 388–399, abr. 1969. Citado na página 53.
- DONG, X.; KONG, W.; CUI, T. Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 2, p. 552–559, Apr. 2009. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 12 and 16.
- DUBE, L. *User Guide to Models in ATP*. USA, 1996. Citado na página 55.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Projeção da Demanda de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 2.
- FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P. *ATP – Alternative Transients Program: Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. CLAUÉ: Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996. Citado na página 53.
- FRANÇA, R. L. da S. *Proteção de Linhas de Transmissão de Corrente Alternada Baseada em Ondas Viajantes Utilizando um Terminal*. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFRN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, dec. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 19 and 29.

- GALE, P. F.; CROSSLEY, P. A.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B. J.; BARKER, J. R. G. Fault location based on travelling waves. In: *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 54–59. Citado na página 25.
- GOMES, M. F. B. *Avaliação da Proteção Diferencial Transversal Aplicada às Linhas de Transmissão de Circuito Duplo*. 82 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, jul. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 2, 10, and 57.
- GU, Y. H.; BOLLEN, M. H. J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 15, n. 4, p. 1279–1284, Oct. 2000. ISSN 0885-8977. Citado na página 21.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.l.], 2004. Citado 6 vezes nas páginas iv, 45, 51, 52, 56, and 78.
- IZYKOWSKI, J.; BOZEK, M. Distance protection of double-circuit transmission lines with compensation for the reactance effect under standard availability of measurements. *Wroclaw University of Technology. -2008.-20 September.(19)*, 2008. Citado na página 6.
- LEUVEN EMTF CENTER. *ATP – Alternative Transients Program: Rule Book*. Herverlee, Belgium, 1987. Citado na página 53.
- MAGALHAES, F. M. de; MONTEIRO, B. C. R.; LOPES, F. V. Using current traveling waves to implement directional elements in parallel lines. In: *2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 28.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, p. 674–693, Jul. 1989. ISSN 0162-8828. Citado na página 22.
- METELLO, E. *Transformada Wavelet Aplicada à Localização de Faltas por Ondas Viajantes*. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, nov. 2012. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19, and 22.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA E EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética: Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. 2017. Citado na página 16.
- MOLAS, E. C. *Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no Plano Alfa: Modelagem e Simulação*. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UnB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, nov. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 2.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 20.1: Glossário de Termos Técnicos*. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado na página 4.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 4.

- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. R. *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007. Citado 4 vezes nas páginas vii, 1, 2, and 47.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8. Citado na página 28.
- SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Adaptive protection of parallel transmission lines using combined cross-differential and impedance-based techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1829–1840, Jul. 2011. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas 11, 32, and 42.
- SANTOS, V. A. dos. *Proteção de Distância Aplicada a Linhas de Transmissão em Circuito Duplo*. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — COPPE/UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, set. 2007. Citado na página 3.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 95–110. Citado 5 vezes nas páginas 17, 23, 25, 29, and 39.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–17. Citado 6 vezes nas páginas iv, 12, 14, 23, 24, and 25.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *Instruction Manual. SEL-T400L - Ultra-High-Speed Transmission Line Relay - Traveling-Wave Fault Locator - High-Resolution Event Recorder*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://selinc.com/products/T400L/>>. Citado 4 vezes nas páginas 23, 29, 36, and 38.
- SHARAFI, A.; SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Ultra-high-speed protection of parallel transmission lines using current travelling waves. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 6, Jun. 2011. Citado 5 vezes nas páginas 13, 16, 21, 26, and 43.
- SHARAFI, A.; SANAYE-PASAND, M.; JAFARIAN, P. Non-communication protection of parallel transmission lines using breakers open-switching travelling waves. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 6, n. 1, p. 88–98, Jan. 2012. ISSN 1751-8687. Citado 2 vezes nas páginas 4 and 12.
- SIDHU, H. S. *HIGH SPEED DIGITAL PROTECTION OF EHV TRANSMISSION LINES USING TRAVELING WAVES*. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, apr. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 17 and 18.
- SOUZA, T. B. P. de. *Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Falhas: Uma Abordagem Wavelet*. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFPA: Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, fev. 2007. Citado na página 25.
- SRIVANI, S.; VITTAL, K. Three zone quadrilateral adaptive distance relay for the protection of parallel transmission line with mutual coupling. *International Journal of Electrical Engineering*, 2010. Citado na página 7.

- TAVARES, M. C. D.; CAMPOS, P. G.; PRADO, P. *Guia Resumido do ATP – Alternative Transients Program*. UNICAMP. Campinas, SP, 2003. Citado na página 53.
- TRIPATHY, L. N.; DASH, P. K.; SAMANTARAY, S. R. A new cross-differential protection scheme for parallel transmission lines including upfc. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 4, p. 1822–1830, Aug. 2014. ISSN 0885-8977. Citado na página 10.
- V.LOPES, F.; U.IURINIC, L.; L.A.NEVES, W.; JR., D. F.; BRETAS, A. S. Localização de faltas baseada em ondas viajantes e aproximações típicas da velocidade de propagação. *Congresso Brasileiro de Automática*, p. 8, 9 2014. Citado na página 76.
- WANG, Q.; DONG, X.; BO, Z.; CAUNCE, B.; APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D. Cross differential protection of double lines based on super-imposed current. In: *CIGRE 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 71.
- WANG, Q. P.; DONG, X. Z.; BO, Z. Q.; CAUNCE, B. R. J.; APOSTOLOV, A. Application of percentage cross differential relay in ehv double lines. In: *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9, and 34.
- WANG, Q. P.; DONG, X. Z.; BO, Z. Q.; CAUNCE, B. R. J.; THOLOMIER, D.; APOSTOLOV, A. Protection scheme of cross differential relay for double transmission lines. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 2697–2701 Vol. 3. ISSN 1932-5517. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 34.
- WILKINSON, W. A.; COX, M. D. Discrete wavelet analysis of power system transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 4, p. 2038–2044, Nov. 1996. ISSN 0885-8950. Citado na página 22.
- YOUSSEF, O. A. S. New algorithm to phase selection based on wavelet transforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 4, p. 908–914, Oct. 2002. ISSN 0885-8977. Citado na página 42.
- ZHANG, G.; SHU, H.; LOPES, F.; LIAO, Y. Single-ended travelling wave-based protection scheme for double-circuit transmission lines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, p. 13, 10 2017. Citado 4 vezes nas páginas 4, 14, 15, and 35.