



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

MARCO PAOLO SOVERO HUAMANI

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO
VIA MODELS-ATP PERMITINDO TESTE DE SOFTWARE-IN-THE-LOOP

CAMPINAS
2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

MARCO PAOLO SOVERO HUAMANI

IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS DE PROTEÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO VIA
MODELS-ATP PERMITINDO TESTE DE SOFTWARE-IN-THE-LOOP

*DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE
ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO DA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS COMO
PARTE DOS REQUISITOS EXIGIDOS PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA, NA ÁREA DE ENERGIA
ELÉTRICA.*

ORIENTADORA: PROFA. DRA. MARIA CRISTINA DIAS TAVARES

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO MARCO PAOLO SOVERO HUAMANI,
E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. MARIA
CRISTINA DIAS TAVARES

ASSINATURA DA ORIENTADORA

CAMPINAS
2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

So89i Sovero Huamani, Marco Paolo, 1992-
Implementação de algoritmos de proteção no domínio do tempo via models-atp permitindo teste de software-in-the-loop / Marco Paolo Sovero Huamani. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Ondas viajantes. 2. Sistema de transmissão digital. 3. Simulação (Computadores). 4. Algoritmos. I. Tavares, Maria Cristina Dias, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Implementation of protection algorithms in the time domain via models-atp allowing software-in-the-loop testing

Palavras-chave em inglês:

Traveling waves

Electrical transmission system

Simulation (Computers)

Algorithms

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Maria Cristina Dias Tavares [Orientador]

Felipe Vigolvino Lopes

Flavio Bezerra Costa

Data de defesa: 27-11-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7719-071X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6496834107553016>

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Marco Paolo Sovero Huamani

RA: 209415

Data da Defesa: 27 de novembro de 2019

Título da Dissertação: “Implementação de algoritmos de Proteção no Domínio do Tempo via MODELS-ATP permitindo teste de *Software-In-The-Loop*”

Membros da Banca:

- Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente, FEEC/UNICAMP)
- Prof. Dr. Felipe Vigolvino Lopes (Membro Externo, UNB)
- Prof. Dr. Flavio Bezerra Costa (Membro Externo, UFRN)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

*This dissertation is dedicated to my parents, Carmen
and Jaime, and my brothers, Veronica and Ernesto.*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

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

Aos meus pais, Carmen e Jaime, pelo amor, carinho com que me criaram e pelo apoio e suporte incondicional que deram durante minha trajetória acadêmica. Eles são os principais responsáveis pelas minhas conquistas.

Aos meus irmãos, Veronica e Ernesto, que sempre estiveram presentes apoiando-me e aconselhando-me em cada passo que dou na vida, assim como, meus tios e primos que sempre estiveram me dando força para não abaixar a cabeça durante os momentos difíceis.

À professora Maria Cristina, por ter me aceitado e dado a oportunidade de realizar o mestrado, pela sua ótima orientação e dedicação que me permitiram chegar ao fim desta etapa, mesmo com todas as dificuldades e obstáculos durante esta trajetória.

À UNICAMP e ao laboratório LTRANSP por me deixar usar suas instalações e equipamentos elétricos contribuindo com minha formação.

A todos meus amigos e colegas, em especial, Claudia, John, Fransk, Hever, Javier, Wilmer, Erik, Ángel, Andy, Juan, Giancarlos, Luis e Wessly que estiveram presentes e me deram suporte, conselhos e não me deixaram abaixar a cabeça, acompanhando meu mestrado.

RESUMO

Neste trabalho implementa-se um modelo de relé digital de proteção no domínio do tempo para linhas de transmissão baseado na teoria de grandezas incrementais e ondas viajantes. Os elementos de proteção utilizados são integrados dentro do programa ATP (Alternative Transient Program) através da sua linguagem interna estruturada MODELS para simular, modelar e visualizar a dinâmica entre o sistema elétrico de potência e os algoritmos do relé desenvolvido permitindo teste de Software-in-the-Loop (SIL). Toda a modelagem, desde as diferentes configurações dos sistemas elétricos usados até componentes, algoritmos e lógicas do relé de proteção, é descrita detalhadamente, seguida de extensivas simulações de falta para testar e validar o desempenho do modelo desenvolvido.

Os elementos de proteção implementados são baseados nos elementos direcional (TD32) e de distância (TD21), que utilizam grandezas incrementais, e nos elementos direcional (TW32) e diferencial (TW87) baseados em ondas viajantes. As funções de proteção TD e TW são avaliadas de maneira individual através de simulações pontuais de falta e através de simulações em massa para cobrir a maioria de casos possíveis do defeito. Em seguida todos esses elementos são integrados dentro de uma lógica de disparo para operar em combinação, propiciando abertura da linha em tempos meios menores do que um quarto de ciclo (4,167 ms em um sistema de 60 Hz), permitindo detectar faltas e dar ordem de abertura nas linhas em apenas poucos milissegundos, trazendo inúmeros benefícios para o sistema de potência, e finalmente possibilitando a redução dos tempos de eliminação das faltas.

Palavras-chave: ATP. MODELS. Software-in-the-Loop (SIL). Proteção no domínio do tempo. Grandezas incrementais. Ondas viajantes. Linhas de Transmissão.

ABSTRACT

In this work, a time-domain digital relay model for transmission lines based on the theory of incremental quantities and traveling waves is implemented. The used protection elements are integrated into the ATP (Alternative Transient Program) program through its internal MODELS language to simulate, model and visualize the dynamics between the power system and the developed relay algorithms enabling a Software-in-the-Loop (SIL) simulation. All modeling, from the different configurations of the electrical systems used to the protection relay components and algorithms, is described in detail, followed by extensive fault simulations to test and validate the performance of the developed model.

The implemented protection elements are based on directional (TD32) and distance (TD21) elements, which are based on time domain quantities and on directional (TW32) and differential (TW87) elements that in turn are based on traveling waves. Each protection element is individually assessed through specific fault cases and through mass simulations to cover most possible fault cases. All of these elements provide ultra-high-speed detection, allowing fault detection and line tripping signaling in just few milliseconds, bringing numerous benefits to the power system, that eventually results in reduced fault clearing times.

Keywords: *ATP. MODELS. Software-in-the-Loop (SIL). Time-Domain protection. Incremental Quantities. Traveling waves. Transmission lines.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Capacidade de transferência do sistema de potência e os critérios das áreas iguais, (a) caso instável, (b) caso estável e (c) maior margem de estabilidade.....	24
Figura 3.1: Teorema de superposição, (a) Rede sob falta, (b) rede pré-falta, (c) rede puramente faltosa...	40
Figura 3.2: Sistema monofásico simples com duas fontes e uma falta em F	41
Figura 3.3: Rede puramente faltosa do sistema da Figura 3.2 para análises das grandezas incrementais...	42
Figura 3.4: Princípio de operação TD32: (a) Falta à frente e (b) Falta Reverso.....	47
Figura 3.5: Sinais de tensão e corrente de réplica incremental instantâneos para faltas à frente (a) e reversa (b).....	48
Figura 3.6: Torque operante e torques de restrição à frente e reverso do elemento direcional TD32 para uma falta à frente	49
Figura 3.7: Princípio de operação do elemento de sub-alcance TD21 para faltas em sua zona protegida (F1) e fora da sua zona (F2)	50
Figura 3.8: Cálculo do sinal de restrição (V21RST) do elemento TD21: diagrama lógico (a) e exemplo de operação no tempo (b).....	52
Figura 3.9: Propagação das Ondas Viajantes em ambas direções desde o ponto de falta (F)	53
Figura 3.10: Circuito simplificado do TPC com capacitâncias parasitas através do reator de sintonização e do transformador redutor.....	54
Figura 3.11: TWs que trafegam na linha de transmissão monofásica	55
Figura 3.12: Circuito equivalente de um segmento de linha de transmissão monofásica	56
Figura 3.13: TWs de corrente incidente (iI), transmitida (iT), e refletida (iR).	58
Figura 3.14: (a) Ondas viajantes para uma falta à frente, (b) ondas viajantes para uma falta reversa	60
Figura 3.15: Princípio de Operação do elemento TW32: (a) falta à frente, e (b) falta reversa.....	61
Figura 3.16: OV de corrente para uma falta externa	62
Figura 3.17: TWs de corrente para uma falta interna.....	62
Figura 3.18: TWs de corrente no domínio do tempo para uma falta interna	64
Figura 3.19: TWs de corrente no domínio do tempo para uma falta externa	64
Figura 4.1: Diagrama simplificado de aquisição e processamento de dados.....	66
Figura 4.2: Sampler and Holder com frequência de amostragem de 10 kHz	67
Figura 4.3: Corrente de falta $-i$ e sua saída através do filtro DS – iTW (valores secundários)	70
Figura 4.4: Filtro DS (a) Janela de coeficientes e (b) operação em resposta a uma entrada degrau (SCHWEITZER et al., 2017)	70
Figura 4.5: Princípio de operação da lógica de partida (SEL, 2017)	72

Figura 4.6: Lógica de identificação dos loops envolvidos na falta	72
Figura 4.7: Lógica simplificada do elemento TD32, loop AT	73
Figura 4.8: Diagrama lógico simplificado do elemento TD21, loop AT	75
Figura 4.9: Diagrama da lógica de detecção TW	77
Figura 4.10: Diagrama lógico simplificado do elemento TW32 (para fase A) (GUZMÁN et al., 2018) ...	78
Figura 4.11: Obtenção das amostras de tempos FIRST e EXIT das TW de corrente para o elemento TW87	80
Figura 4.12: Princípio de Operação da Tensão de Polarização	83
Figura 4.13: Modelo computacional do relé no domínio do tempo.	84
Figura 4.14: Princípio de Operação do elemento de Sobrecorrente Instantâneo (SEL T400L, 2017).	85
Figura 4.15: Lógica chave do transmissor para acelerar o esquema POTT – fase A (SEL T400L, 2017)..	86
Figura 4.16: Lógica do receptor do esquema POTT- fase A (SEL T400L, 2017).....	87
Figura 5.1: Sistema teste 01 de 525 kV implementado no programa ATP	89
Figura 5.2: Sistema teste de 230 kV proposto pelo IEEE Power System (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004)	91
Figura 5.3: Caso 01 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 (a) no terminal local e (b) remoto	93
Figura 5.4: Caso 01 – Grandezas incrementais do loop AT, torque e torques acumulado operante e de restrição do elemento TD32 nos terminais (a) local e (b) remoto	94
Figura 5.5: Caso 01 - Tensão de operação (VOP21) e de restrição (VRST21), diferença de tensão acumulada (TDIFF21) nos terminais (a) local e (b) remoto.....	95
Figura 5.6: Caso 02 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 (a) no terminal local e (b) remoto	96
Figura 5.7: Caso 02 – Grandezas incrementais do loop CA, torque e torques acumulado operante e de restrição do elemento TD32 nos terminais (a) local e (b) remoto	96
Figura 5.8: Caso 02 - Tensão de operação (VOP21) e de restrição (VRST21), diferença de tensão acumulada (TDIFF21) nos terminais (a) local e (b) remoto.....	97
Figura 5.9: Caso 03 – Sinais de restrição e operante, diferença de tensão acumulada e resposta do elemento TD21 ante a variação da resistência de Falta, $R_f = 0 \Omega$ (cor vermelha) e $R_f = 50 \Omega$ (cor verde)	98
Figura 5.10: Tempos de Operação médio do elemento TD21 em função da resistência de falta ao variar a localização do defeito.....	99
Figura 5.11: Caso 04 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 (a) no terminal local e (b) remoto	100

Figura 5.12: Caso 04 – Grandezas incrementais do loop BC, torque e torques acumulado operante e de restrição do elemento TD32 nos terminais (a) local e (b) remoto	101
Figura 5.13: Caso 05 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 para níveis de tensão (a) com um valor negativo e (b) com um ponto máximo.....	102
Figura 5.14: Caso 05 –Grandezas incrementais, sinais de restrição e operante e resposta do elemento TD21 para níveis de tensão (a) com um valor negativo e (b) com um ponto máximo	102
Figura 5.15: Efeito do ponto na onda de tensão nos tempos de operação dos elementos TD21 e TD32 para faltas monofásicas.....	103
Figura 5.16: Curva dos tempos de operação médio do elemento TD21 em função da localização da falta para diferentes valores do SIR.....	104
Figura 5.17: Curva dos tempos de operação médio do elemento TD32 em função da localização de falta para diferentes valores do SIR.....	105
Figura 5.18: Caso 06 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto	106
Figura 5.19: Caso 06 - Sinais de TWs de tensão e corrente da fase A e o torque acumulado do elemento TW32 (a) no terminal local e (b) remoto	107
Figura 5.20: Caso 06 - (a) TW do modo alfa da corrente referida à fase A, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87.....	108
Figura 5.21: Caso 06: (a) TW de corrente por fase nos terminais local e remoto da LT e seus respectivos tempos de trânsito (b) localizações de falta (TW87FL) em pu.....	108
Figura 5.22: Caso 06 - (a) Tensão nos terminais local e remoto, tensão de polarização; e (b) correntes de operação da fase envolvida na falta.	109
Figura 5.23: Caso 07 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto	110
Figura 5.24: Caso 07 - Sinais de TWs de tensão e corrente da fase C e o torque acumulado do elemento TW32 (a) no terminal local e (b) remoto	110
Figura 5.25: Caso 07 - (a) TW de corrente, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87.....	111
Figura 5.26: Caso 08 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto	112
Figura 5.27: Caso 08 - Sinais de TWs de tensão e corrente da fase B e o torque do elemento TW32 (a) no terminal local e (b) remoto	113
Figura 5.28: Caso 08 - (a) TW de corrente, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87.....	113

Figura 5.29: Caso 08: (a) TW da corrente por fase nos terminais local e remoto da LT e (b) localização de falta (TW87FL) em pu.	114
Figura 5.30: Caso 09 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto	115
Figura 5.31: Caso 09 - (a) TWs de corrente, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87.....	115
Figura 5.32: Caso 09 - (a) Tensões nos terminais local e remoto, tensão de polarização; e (b) correntes de operação das fases envolvidas na falta.....	116
Figura 5.33: Caso 10 - Sinais por fase de tensões, correntes e saídas digitais para um ângulo de incidência de (a) 90° e (b) 0°.....	118
Figura 5.34: Caso 10 - Saídas digitais e o disparo para um ângulo de incidência de 90° (a) e 0° (b)	119
Figura 5.35: Forma de onda de tensão em pu do lado primário e secundário considerando um TPC.	120
Figura 5.36: Caso 11 - Sinais de onda viajante (TW) de tensão e corrente, e o disparo das funções de proteção TW considerando um (a) TPC e um (b) TP ideal.....	121
Figura 5.37: Caso 11 - Sinais por fase de tensões, correntes e saídas digitais considerando um (a) TPC e (b) um TP ideal.....	122
Figura 5.38: Caso 11 - Saídas digitais e o Trip considerando (a) um TPC e (b) TP ideal.....	123
Figura 5.39: Caso 12 – Sinais de TW do modo de propagação alfa da fase A local e remota de tensão e corrente (a) Bergeron – 60Hz, (b) Bergeron – 50kHz e (c) JMarti.....	125
Figura 5.40: Caso 12 - Sinais por fase de tensões, correntes e saídas digitais considerando um modelo de linha (a) Bergeron – 60Hz, (b) Bergeron – 50kHz e (c) JMarti.....	127
Figura 5.41: Influência do ângulo de incidência nos tempos de operação do trip.....	128
Figura 5.42: Variação do nível de curto-circuito (SIR) considerando o efeito do ponto na onda de tensão (a) com valor nulo e (b) somente com valor perto do pico.....	129
Figura 5.43: Influência do ângulo de transmissão nos tempos de operação do disparo.....	130
Figura 5.44: Influência da resistência de falta nos tempos de operação do disparo.....	131
Figura 5.45: Percentual de operações: TD21G, TD32F, TW32F e TW87.....	132
Figura 5.46: Distribuição das operações dos elementos TD: (a) elemento direcional à frente TD32F e (b) elemento de distância TD21G.....	133
Figura 5.47: Distribuição das operações dos elementos TW: (a) elemento direcional à frente TW32F e (b) a função diferencial TW87.....	133
Figura 5.48: Distribuição das operações do disparo.....	134
Figura A.1: Sistema Teste 01 em 525 kV implementado no ATPDRAW.....	145

Figura A.2: Geometria da linha de transmissão e suas coordenadas em metros utilizada nas simulações - Altura média.	146
Figura A.3: Sistema teste 02 em 230 kV implementado no ATP (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004).....	148
Figura A.4: Circuito Transformador Potencial Capacitivo implementado no ATP.....	150
Figura A.5: Resposta em frequência do TPC: (a) curva típica e (b) grupo de curvas considerando uma capacitância parasita arbitrária em paralelo com o reator de compensação.	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Loops das tensões e correntes de réplica incrementais no domínio do tempo	46
Tabela 4.1: Ajuste do elemento TD32	74
Tabela 4.2: Ajuste do elemento TD21	76
Tabela 5.1: Parâmetros da linha protegida do sistema teste 01 em análise	90
Tabela 5.2: Casos de Falta simulados para testar a Proteção Baseada em Grandezas Incrementais (TD)..	90
Tabela 5.3: Casos de Falta simulados para testar a Proteção Baseada em Ondas Viajantes (TW).....	92
Tabela 5.4: Ajuste dos elementos de proteção TD21 e TD32	92
Tabela 5.5: Casos de Falta simulados para testar o Desempenho do Esquema de Proteção (TD e TW) ..	117
Tabela A.1: Características dos condutores da linha de transmissão de 525 kV	146
Tabela A.2: Parâmetros da linha de transmissão em 525 kV a 60 Hz	147
Tabela A.3: Impedâncias da Fonte S1.....	148
Tabela A.4: Parâmetros mais ressaltantes do Transformador TR2H	149
Tabela A.5: Geometria de torres das linhas de transmissão em 230 kV	150
Tabela A.6: Parâmetros do TPC de 525 kV	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program.</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers.</i>
PSCR	<i>Power System Committee Relaying.</i>
SIL	<i>Software-in-the-Loop.</i>
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
TW	<i>Traveling Waves.</i>
TD	<i>Time Domain.</i>
LT	Linha de Transmissão.
POTT	<i>Permissive Overreaching Transfer Trip.</i>
DTT	<i>Direct Transfer Trip.</i>
TD21	Elemento de Proteção Distância Baseado em Grandezas Incrementais.
TD32	Elemento de Proteção Direcional Baseado em Grandezas Incrementais.
TW32	Elemento de Proteção Direcional Baseado em Onda Viajante.
TW87	Elemento de Proteção Diferencial Baseado em Onda Viajante.
Filtro <i>DS</i>	Filtro <i>Differentiator-Smoother.</i>
TWLPT	Traveling Wave Line Propagation Time.
UAV	Ultra Alta Velocidade.
TC	Transformador de Corrente.
TP	Transformador de Potencial.
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo.
RTC	Relação do Transformador de Corrente.
RTP	Relação do Transformador Potencial.
SIR	<i>Source Impedance Ratio.</i>
R	Resistência por unidade de comprimento.
L	Indutância por unidade de comprimento.
C	Capacitância por unidade de comprimento.
G	Condutância por unidade de comprimento.

δ	Ângulo de carregamento.
Δi_Z	Corrente de Réplica incremental instantâneo.
Δi_{ZA}	Corrente de Réplica incremental instantâneo do <i>loop</i> da fase A.
Δi_{ZAB}	Corrente de Réplica incremental instantâneo do <i>loop</i> das fases AB.
Δv	Tensão incremental instantâneo.
Δv_A	Tensão incremental instantâneo do <i>loop</i> da fase A.
Δv_{AB}	Tensão incremental instantâneo do <i>loop</i> das fases AB.
i_ϕ	Corrente por Fase.
v_ϕ	Tensão por Fase.
i_{TW}	Corrente de Onda Viajante.
v_{TW}	Corrente de Onda Viajante.
i_{TWA}	Corrente de Onda Viajante da fase A.
v_{TWA}	Tensão de Onda Viajante da fase A.
$i_{TW\phi}$	Corrente de Onda Viajante por fase.
$v_{TW\phi}$	Tensão de Onda Viajante por fase.
i_{TW1A}	Corrente de Onda viajante do Modo de Propagação <i>alfa</i> referida na fase A.
i_{TW2A}	Corrente de Onda viajante do Modo de Propagação <i>beta</i> referida na fase A.
i_{TW1B}	Corrente de Onda viajante do Modo de Propagação <i>alfa</i> referida na fase B.
i_{TW2B}	Corrente de Onda viajante do Modo de Propagação <i>beta</i> referida na fase B.
i_{TW1C}	Corrente de Onda viajante do Modo de Propagação <i>alfa</i> referida na fase C.
i_{TW2C}	Corrente de Onda viajante do Modo de Propagação <i>beta</i> referida na fase C.
i_{TW0}	Corrente de Onda viajante do Modo de Terra.
Z1MAG	Impedância de linha de sequência positiva em ohms secundários.
Z0MAG	Impedância de linha de sequência zero em ohms secundários.
TD21G	Elemento de distância de terra baseado em grandezas incrementais.
TD21P	Elemento de distância de fases baseado em grandezas incrementais.
TD21MP	Alcance do elemento de distância de fases.
TD21MG	Alcance do elemento de distância de terra.
TD32ZF	Elemento direcional direto baseado em grandezas incrementais.
TD32ZR	Elemento direcional reverso baseado em grandezas incrementais.
SOP	Torque Operante do elemento direcional TD32.

SREV	Torque de Restrição reverso do elemento direcional TD32.
SFWD	Torque de Restrição à frente do elemento direcional TD32.
TOP	Torque Operante Acumulado do elemento direcional TD32.
TW32F	Elemento direcional direto baseado em ondas viajantes.
TW32R	Elemento direcional reverso baseado em ondas viajantes.
TD32ZF	Limiar de impedância à frente do elemento TD32.
TD32ZR	Limiar de impedância reverso do elemento TD32.
VOP21	Tensão de Operação do Elemento de Proteção TD21.
VRST21	Tensão de Restrição do Elemento de Proteção TD21.
IRS	Corrente de Onda Viajante de Restrição do elemento TW87.
IOP	Corrente de Onda Viajante de Operação do elemento TW87.
AT	Fase A para Terra.
BT	Fase B para Terra.
CT	Fase C para Terra.
ABT	Fases A e B para Terra.
BCT	Fases B e C para Terra.
CAT	Fases C e A para Terra.
AB	Fases A e B.
BC	Fases B e C.
CA	Fases C e A.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I.....	21
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	21
1.2. TECNOLOGIA NO DOMÍNIO DO TEMPO	22
1.3. MOTIVAÇÃO.....	25
1.4. OBJETIVOS DO TRABALHO	26
1.5. CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	26
1.6. PUBLICAÇÃO DECORRENTE DA PESQUISA.....	27
1.7. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	27
2. CAPÍTULO II.....	28
2.1. PROTEÇÃO TRADICIONAL BASEADA EM FASORES	28
2.2. PROTEÇÃO BASEADA NO DOMÍNIO DO TEMPO	30
3. CAPÍTULO III	37
3.1. FUNDAMENTOS DE DESEMPENHO DE PROTEÇÃO DE LINHAS.....	37
3.2. GRANDEZAS INCREMENTAIS.....	38
3.2.1. PRINCÍPIO DE SUPERPOSIÇÃO E TEOREMA DE THEVENIN	39
3.2.2. RELAÇÃO DAS TENSÕES E CORRENTES NO DOMÍNIO DO TEMPO	41
3.2.3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DIRECIONAL <i>TD32</i>	46
3.2.4. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DE DISTÂNCIA <i>TD21</i>	49
3.3. PROTEÇÃO DE LINHA BASEADA EM ONDA VIAJANTE	53
3.3.1. FENÔMENO DE ONDA VIAJANTE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	54
3.3.2. EQUACIONAMENTO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA NUMA LINHA DE TRANSMISSÃO	56
3.3.3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DIRECIONAL <i>TW32</i>	59
3.3.4. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DIFERENCIAL <i>TW87</i>	61
4. CAPÍTULO IV.....	65
4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS E PROCESSAMENTO DOS SINAIS	65
4.1.1. FILTRO ANALÓGICO.....	66
4.1.2. SAMPLE AND HOLD.....	67
4.1.3. CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL	68
4.1.4. MODELAGEM DO FILTRO DS	69

4.2.	IMPLEMENTAÇÃO DA PROTEÇÃO BASEADA EM GRANDEZAS INCREMENTAIS.....	71
4.2.1.	LÓGICA DO ELEMENTO DIRECIONAL POR GRANDEZAS INCREMENTAIS (TD32).....	73
4.2.2.	LÓGICA DO ELEMENTO DE DISTÂNCIA POR GRANDEZAS INCREMENTAIS (TD21)	74
4.3.	IMPLEMENTAÇÃO DA PROTEÇÃO BASEADA EM ONDAS VIAJANTES.....	76
4.3.1.	LÓGICA DO ELEMENTO DIRECIONAL POR ONDA VIAJANTE (TW32)	77
4.3.2.	LÓGICA DO ESQUEMA DIFERENCIAL POR ONDA VIAJANTE (TW87).....	79
4.4.	IMPLEMENTAÇÃO DO ESQUEMA DE DISPARO	83
4.4.1.	PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ESQUEMA POTT	85
5.	CAPÍTULO V	89
5.1.	DESEMPENHO DA PROTEÇÃO BASEADA EM GRANDEZAS INCREMENTAIS (TD).....	92
5.1.1.	SIMULAÇÃO PONTUAL 01: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO AT NA LT1, NO PONTO 04	93
5.1.2.	SIMULAÇÃO PONTUAL 02: CURTO-CIRCUITO INTERNO BIFÁSICO CAT NA LT1, NO PONTO N01	95
5.1.3.	SIMULAÇÃO PONTUAL 03: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO BT NA LT1 NO PONTO N05 COM RESISTÊNCIA DE FALTA 0Ω E 50Ω	97
5.1.4.	SIMULAÇÃO EM MASSA 01: INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FALTA NO ELEMENTO DE PROTEÇÃO TD21	99
5.1.5.	SIMULAÇÃO PONTUAL 04: CURTO-CIRCUITO EXTERNO BIFÁSICO BC NA LT2	99
5.1.6.	SIMULAÇÃO PONTUAL 05: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO CT NO PONTO 05 COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA.....	101
5.1.7.	SIMULAÇÃO EM MASSA 02: INFLUÊNCIA DO PONTO NA ONDA DE TENSÃO DE FALTA NOS ELEMENTOS TD21 E TD32	103
5.1.8.	SIMULAÇÃO EM MASSA 03: IMPACTO DO SIR NOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO TD21 E TD32	104
5.2.	DESEMPENHO DA PROTEÇÃO BASEADO EM ONDAS VIAJANTES (TWs)	105
5.2.1.	SIMULAÇÃO PONTUAL 06: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO AT NA LT1, NO PONTO L1F3 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 90°	106
5.2.2.	SIMULAÇÃO PONTUAL 07: CURTO-CIRCUITO INTERNO BIFÁSICO BCT NA LT1, NO PONTO L1F3 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 60°	109
5.2.3.	SIMULAÇÃO PONTUAL 08: CURTO-CIRCUITO EXTERNO MONOFÁSICO BT NA LT3, NO PONTO L4F5 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 240°	111
5.2.4.	SIMULAÇÃO PONTUAL 09: CURTO-CIRCUITO EXTERNO BIFÁSICO CA NA LT2, NO PONTO L2F5 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 120°	114

5.3.	DESEMPENHO DO ESQUEMA DE DISPARO.....	116
5.3.1.	SIMULAÇÃO PONTUAL 10: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO CT NA LT1, VARIANDO O ÂNGULO DE INCIDÊNCIA NO PONTO 05.....	117
5.3.2.	SIMULAÇÃO PONTUAL 11: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO BT NA LT1, COM EFEITO DO TPC NO PONTO N02	120
5.3.3.	SIMULAÇÃO PONTUAL 12: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO AT NA LT1, COM CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE LT NA FREQUÊNCIA 100 KHZ E 60 HZ.	124
5.3.4.	SIMULAÇÃO EM MASSA 10: DESEMPENHO DO ESQUEMA DE PROTEÇÃO.....	127
5.3.5.	DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO NOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO TD E TW 131	
6.	CAPÍTULO VI.....	136
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
	APÊNDICE A	145
	APÊNDICE B.....	153

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O contínuo e crescente aumento da demanda por energia elétrica implica na transferência de potências cada vez maiores pelo sistema de transmissão, diminuindo suas margens de estabilidade e fazendo com que o sistema elétrico opere próximo ao seu limite de estabilidade em regime permanente, ficando vulnerável durante perturbações severas, como os curtos-circuitos. Além disso, a inserção de novas fontes de energia intermitentes, como as gerações eólicas e fotovoltaicas, tem impacto na resposta transitória do sistema por conta do uso de eletrônica de potência para a sua conexão com o sistema elétrico. Estas fontes são desligadas rapidamente em momentos de perturbação e apresentam baixa inércia (ABBOUD, 2018). Essa desconexão diminui a inércia do sistema elétrico e contribui para que as áreas operativas se distanciem eletricamente uma das outras nos momentos pós-falta, gerando instabilidade.

Nesse sentido, sabe-se que a margem de estabilidade de um sistema elétrico está associada diretamente com o tempo crítico de eliminação de falta (t_{elim}), que é um pouco maior do que o tempo de operação do sistema de proteção (t_{det}) acrescido do tempo de interrupção do disjuntor (t_{dis}). Portanto, quanto menores forem os tempos de eliminação de falta, maiores serão as margens de estabilidade, e conseqüentemente, maior será a quantidade de potência que poderá ser transferida (SCHWEITZER et al., 2015).

Os relés de proteção tradicionais operam tipicamente na ordem de um a um ciclo e meio (16,67 a 25 ms em sistemas de 60 Hz) (SCHWEITZER et al., 2015), grande parte desse tempo é devido aos algoritmos e lógicas de proteção interna que são baseados em fasores. Já o tempo de interrupção de corrente pelo disjuntor é de um ciclo e meio a três ciclos (25 a 50 ms em um sistema de 60 Hz), resultando em um tempo médio de eliminação de falta de três a quatro ciclos. Desse modo, o tempo de atuação do sistema de proteção baseadas em técnicas tradicionais

representam de 25 a 50% do tempo total para a eliminação de falta. Embora, em condições específicas, métodos tradicionais atuem em até meio ciclo, considerações de limite de estabilidade devem ser feitas assumindo-se tempos conservadores de atuação da proteção (SCHWEITZER et al., 2015). Na publicação de Eastvedt em 1976 demonstrou-se que para uma linha da BPA (*Bonneville Power Administration*) uma redução de um ciclo no tempo de eliminação de falta incrementou a capacidade de potência transmitida segura em 250 MW, ou seja, 15 MW/ms, deixando bem clara a relevância de se ter uma proteção que atue mais rapidamente. Em outros termos, cada milissegundo salvo pode significar um alimentador novo para a linha, ou a conexão de uma carga de outra ordem de grandeza a ser alimentada no sistema de distribuição.

Pesquisas ao longo dos anos que buscaram melhorar o desempenho e os benefícios da proteção do sistema de potência desenvolveram técnicas de proteção que extraem informações dos transitórios eletromagnéticos resultantes dos defeitos que ocorrem nas linhas de transmissão. Esses princípios de operação analisam os componentes induzidos pelas faltas no domínio do tempo, combinando as teorias baseadas em ondas viajantes (TW: *Traveling Waves*) e grandezas incrementais (TD: *Time Domain*), criando um dispositivo de proteção que diminui consideravelmente os tempos de operação (SEL, 2017). Além disto, em (MARX et al., 2013) a detecção dos transitórios induzidos por um defeito em uma linha de transmissão junto com as oscilografias de alta resolução permitiu a aplicação de métodos de localização de falta baseados em ondas viajantes (TWFL: *Traveling Wave Fault Locator*) criando localizadores de faltas em tempo real. Estes métodos produzem informação de excelente precisão sobre o ponto do defeito, reduzindo os custos de operação e manutenção de linhas de transmissão, ao evitar trabalhos longos e dispendiosos de inspeção nas linhas para localizar a seção com defeito.

1.2. TECNOLOGIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

O relé de proteção, equipamento responsável pela detecção das faltas, evoluiu muito com o passar dos anos, indo dos dispositivos eletromecânicos até chegar aos modernos relés numéricos microprocessados. Nos primeiros, a operação se dava pela interação eletromagnética entre as correntes medidas e suas partes móveis. Já os mais recentes, apresentam uma arquitetura completamente digital com o uso de microprocessadores com diversas funcionalidades adicionais, tais como: capacidade de processamento ampliada, captura de oscilografia,

diminuição do intervalo de amostragem dos sinais, lógicas de proteção desenvolvidas com maior confiabilidade e algoritmos de segurança. Isto permitiu uma melhora expressiva do seu desempenho (PAULINO; PENARIOL, 2012).

Hoje, em decorrência do avanço tecnológico e do uso de *hardware* com altas taxas de amostragem na ordem de MHz, processadores muito mais rápidos e potentes, amplo armazenamento de dados e recursos de comunicação estendidos, foi possível o desenvolvimento de uma nova geração de relés de proteção de linha. As novas pesquisas sobre relés de linha de alto desempenho contribuem para a produção de relés que utilizam conjuntamente elementos baseados em grandezas incrementais (TD) e ondas viajantes (TW) com capacidade de identificar e eliminar faltas em linhas de transmissão com velocidades bem rápidas (menores a $\frac{1}{4}$ de ciclo da frequência fundamental), aprimorando a segurança do sistema elétrico em termos de estabilidade durante curtos-circuitos críticos (GUZMÁN et al., 2018) (SCHWEITZER et al., 2014) (SCHWEITZER et al., 2016).

A tecnologia no domínio do tempo, ao invés de utilizar fasores em suas lógicas, opera utilizando o valor instantâneo da corrente e da tensão com altas taxas de amostragem. Isto dispensa a necessidade do cálculo do fasor, e conseqüentemente, o intervalo de 1 ciclo para o esquema de janelamento dos dados entre o período de pré-falta e de falta (estabilização dos fasores), atingindo tempos médios de operação na ordem de 1 a 4 ms (SCHWEITZER et al., 2016). Seus princípios operacionais são baseados nos elementos direcionais de grandezas incrementais (TD32) e de ondas viajantes (TW32), podendo operar em um esquema assistido por comunicações, um esquema diferencial baseado em ondas viajantes (TW87) e um elemento de distância baseado em grandezas incrementais (TD21) supervisionado pelo elemento direcional TD32. Todos esses elementos são elementos de proteção de ultra alta velocidade que combinados dentro de uma lógica de proteção contribuem para uma redução considerável nos tempos de eliminação de faltas (SCHWEITZER et al., 2016).

As proteções baseadas em ondas viajantes (TW) precisam tanto de medição de tensão quanto de corrente, como no caso do elemento direcional TW32. Contudo, o desempenho às vezes é limitado pela resposta do transformador de potencial capacitivo (TPC), que apresenta atenuação para frequências na ordem de kHz e MHz (BAINY et al., 2012; SCHWEITZER et al., 2014). Desta forma é preciso efetuar um estudo a priori para validar a reprodução das

componentes de tensão em alta frequência no lado secundário. Afortunadamente, o transformador de corrente (TC) possui uma boa resposta de alta frequência até 500 kHz, permitindo a medição da corrente de TW (SCHWEITZER et al., 2014). Por essa razão, o esquema diferencial (TW87) e o localizador de faltas baseado em ondas viajantes fazem uso somente das correntes de TW.

Os relés no domínio do tempo exigem apenas poucos ajustes, mas esses geralmente são críticos para o desempenho do relé e estão relacionados às amplitudes das grandezas incrementais e aos tempos de propagação das ondas viajantes. Para a correta operação do relé é necessário que essas informações sobre o sistema elétrico sejam precisas (KASZTENNY et al., 2016). A sua rápida velocidade de resposta ante perturbações acarreta inúmeros benefícios ao sistema elétrico, tais como: um tempo rápido de eliminação das faltas, o que reduz os danos e aumenta o tempo de vida útil dos equipamentos, melhoria da qualidade de energia (relacionada à redução dos afundamentos de tensão), monitoramento preventivo de possíveis defeitos futuros e melhoria da estabilidade durante curto-circuito críticos. Este último fenômeno, relacionado à redução da energia cinética armazenada pelo rotor durante o período de aceleração decorrente de uma falta, pode ser observado na Figura 1.1.

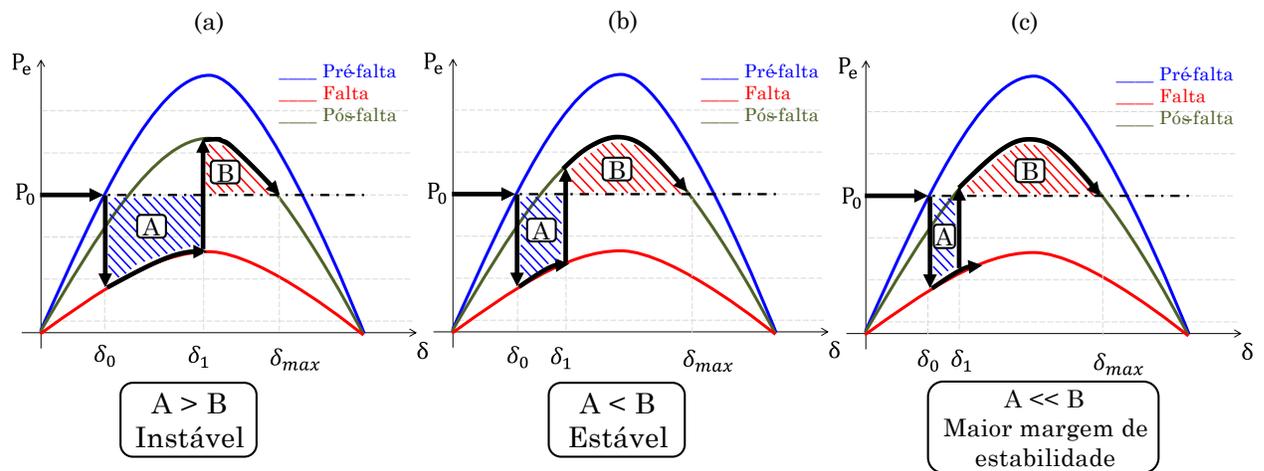


Figura 1.1: Capacidade de transferência do sistema de potência e os critérios das áreas iguais, (a) caso instável, (b) caso estável e (c) maior margem de estabilidade

A proteção por onda viajante (TW) ou grandezas incrementais (TD) deve também ser acompanhada por oscilografias de alta resolução, pois estas permitem identificar eventos indesejados no sistema elétrico que não podem ser visualizados com outros métodos. Os algoritmos de TW e TD também podem ser aplicados em localizadores de falta em tempo real.

Outros benefícios poderiam ser citados, como as melhorias causadas nas aplicações em linhas de transmissão com compensação série ou envolvendo saturação de transformadores de corrente (TCs), porém, entende-se que os benefícios listados acima já são suficientes para demonstrar os ganhos decorrentes da aplicação da proteção de linhas de transmissão no domínio do tempo.

Tendo em vista o recente surgimento desses relés, nasce a necessidade de implementar e testar um modelo em *software* que use como entradas os sinais que se assemelham a eventos reais, permitindo verificar se o relé é adequado para aplicações específicas do sistema de potência disponível. É importante mencionar que um ponto chave na modelagem para avaliação do relé é refletir adequadamente as interações dinâmicas entre o sistema elétrico e o relé implementado durante eventos de falta. Portanto, propõe-se um teste de *Software-in-the-Loop* (SIL), na qual, o sistema elétrico e o modelo do relé interagem dinamicamente por meio da implementação do sistema elétrico no ATP e do relé em linguagem de programação MODELS do *software* ATP.

Para avaliar o desempenho do modelo de relé implementado são usados sistemas de testes nos quais são aplicados extensivos casos de falta pontuais e em massa, demonstrando as potencialidades da abordagem proposta.

1.3. MOTIVAÇÃO

A necessidade de uma proteção de ultra alta velocidade é identificada com base em melhorias na estabilidade do sistema de potência e maior capacidade de transmissão de energia. Este trabalho apresenta um desenvolvimento computacional de um dispositivo de proteção que opera com funções no domínio do tempo (TD e TW), ao invés de fasores (técnicas tradicionais). As funções no tempo proporcionam desligamento seguro das linhas de transmissão em poucos milissegundos, além de ganhos na qualidade da energia e na redução de danos nos equipamentos do sistema.

Para trabalhar com estas novas funções no domínio do tempo é necessário utilizar dispositivos digitais com altas taxas de amostragem. Isto permite analisar sinais de alta frequência de tensão e corrente decorrentes dos fenômenos transitórios derivados de defeitos, além de poder ser aplicado em algoritmos de localização de faltas baseados em ondas viajantes. De fato, por ser uma tecnologia emergente com vários benefícios, as empresas de serviço elétrico têm demonstrado interesse, promovendo uma nova vertente para o sistema de proteção. Mesmo

assim, seus conceitos e princípios operacionais são ainda novos para os engenheiros de proteção, o que justifica o desenvolvimento de modelos computacionais sofisticados que permitam avaliar sua operação e desempenho.

1.4. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral é: estudar e desenvolver um modelo computacional de um relé digital no domínio do tempo através de simulações em malha fechada dentro do ATP. Para isso, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- Fazer uma revisão do estado da arte dos princípios de operação da proteção de linha no domínio do tempo baseados em TWs e grandezas incrementais.
- Utilizar o ambiente MODELS para modelar o processamento e aquisição dos sinais; algoritmos e lógicas de proteção das funções TD32, TD21, TW32 e TW87.
- Automatizar e simular diferentes configurações de sistemas elétricos e faltas no programa ATP através de linguagem MODELS.
- Testar o desempenho do modelo de relé implementado através de extensivas simulações de falta e validar seu comportamento comparando-o com relés comerciais modernos implementados em hardware (SEL T400L, 2017).
- Reduzir os tempos de detecção de falta por meio de uma proteção rápida no domínio do tempo que opera com valores instantâneos e não apresenta um atraso na sua operação, como nas proteções tradicionais baseadas em fasor.

1.5. CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A seguir são apresentadas as contribuições do tema de pesquisa:

- Desenvolvimento de um modelo computacional de relé digital no domínio do tempo em software que permita representar o comportamento de relés comerciais atuais durante condições de distúrbios em um sistema elétrico de potência.
- Avaliação atuação do relé quando este não se encontra disponível, por meio de um modelo computacional sofisticado que represente a interação dinâmica do sistema elétrico com o relé implementado através do teste de *Software-in-the-Loop* (SIL).

1.6. PUBLICAÇÃO DECORRENTE DA PESQUISA

- Marco P. Sovero, Maria C. Tavares. “*A Different Approach for Fast Fault Detection in Transmission Lines based on Traveling Waves*”, IEEE Transactions Power Delivery (em revisão).

1.7. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em seis capítulos conforme é descrito a seguir.

O presente capítulo apresenta a contextualização do tema, uma breve descrição da tecnologia no domínio do tempo, motivação do tema de pesquisa e as principais contribuições, além de identificar o trabalho submetido ao longo da pesquisa.

No Capítulo 2, apresenta-se de forma geral o levantamento do estado de arte relacionado à modelagem de relés numéricos com o programa ATP e a sua linguagem interna MODELS, algoritmos e lógicas dos elementos de proteção baseados em fasores e no domínio do tempo.

No Capítulo 3 realiza-se a revisão teórica da proteção no domínio do tempo abordando as técnicas baseadas em grandezas incrementais (TD: *Time Domain*) e ondas viajantes (OV, em inglês: *Traveling Waves - TW*). São descritos os princípios de operação das funções de proteção TD32, TD21, TW32 e TW87.

No Capítulo 4, desenvolvem-se e descrevem-se o processo de aquisição dos sinais e as lógicas implementadas das funções de proteção no domínio do tempo dentro do ATP fazendo uso da sua linguagem interna MODELS.

No Capítulo 5, são apresentados os testes, análises e resultados das simulações computacionais em malha fechada ATP/MODELS (*Software-in-the-Loop – SIL*), destacando-se os pontos relevantes sobre a atuação das funções de proteção implementadas.

No Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões decorrentes da análise realizada, e as propostas para linhas de pesquisas futuras que possam dar continuidade ao presente estudo.

Por último nos apêndices A e B, são descritos os sistemas elétricos testes avaliados, assim como os códigos MODELS de alguns componentes implementados no ATP.

CAPÍTULO II

ESTADO DA ARTE

Durante a elaboração deste trabalho de pesquisa consultou-se uma grande variedade de trabalhos sobre relés numéricos processados na literatura especializada que foram implementados no programa de transitório ATP (*Alternative Transients Program*), fazendo uso de técnicas tradicionais tais como: proteção de distância, diferencial e direcional. Em seguida foram investigados trabalhos relacionados com o desenvolvimento da tecnologia no domínio do tempo, revisando seus princípios e suas lógicas de operação para posterior implementação na linguagem MODELS.

2.1. PROTEÇÃO TRADICIONAL BASEADA EM FASORES

A maioria dos relés microprocessados operam com princípios baseados em fasores, os quais são obtidos através de um processo interno de estimação fasorial fazendo uso dos sinais filtrados do componente de frequência fundamental e algumas vezes de componentes harmônicas. Esses princípios operacionais pressupõem que os sinais filtrados apresentam formas de onda quase sinusoidais.

Com o advento dos relés modernos o número de parâmetros e a complexidade das funções de proteção aumentaram consideravelmente. Novos modelos computacionais mais complexos foram desenvolvidos com o objetivo de visualizar, ajustar e representar cada módulo que compõe este dispositivo, sendo estas ferramentas utilizadas na produção e testes de outros equipamentos, assim como na avaliação do desempenho dos sistemas de proteção.

Nesse sentido, técnicas baseadas na integração e modelagem do sistema de potência e o sistema de proteção através de programas do tipo EMT (*Electromagnetic Transients Program*) se destacam por permitirem uma análise dinâmica via simulações de malha fechada (*Software in the Loop - SIL*), garantindo uma avaliação mais rigorosa do desempenho do relé de proteção. Assim, foi escolhido o programa denominado ATP (*Alternative Transients Program*), que disponibiliza

linguagens como TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) e MODELS para a modelagem e o controle da interação de cada bloco que faz parte do relé de proteção com o sistema elétrico.

A seguir são citados alguns trabalhos que apresentaram desenvolvimentos computacionais no ATP de relés digitais para linhas de transmissão baseados em fasores. Seus princípios e lógicas de proteção foram implementados através de linguagem MODELS ou através de compilação de programas externos.

(KIM et al., 2000) descreve a implementação dos algoritmos de um relé de distância com a MODELS, provendo os conceitos de proteção sistemática. Casos de estudos relacionados com curto-circuitos monofásico e bifásico são apresentados variando o ângulo de incidência da falta e a localização do ponto de falta.

Em (LUO; KEZUNOVIC, 2006) os autores sugerem uma nova abordagem para simulação de sistemas de proteção, no qual a rede do sistema de potência é modelada pelo programa ATP, enquanto o mecanismo de “modelo externo compilado” da linguagem MODELS é empregado para modelar o relé de proteção digital na linguagem C++, uma programação orientada a objetos, tornando a modelagem mais fácil e menos limitada. Os algoritmos e lógicas do relé elaborado em C++ são inseridos no ATP através da *Foreign Model* (mecanismo da própria MODELS para compilar modelos externos), enquanto que as etapas de aquisição e condicionamento de sinais (filtros, analógicos, conversores A/D) foram desenvolvidas na MODELS.

Em (SILVA; NEVES; SOUZA, 2007) apresenta-se um caso simples no qual o ATP é usado para avaliar o desempenho off-line dos esquemas de proteção de distância aplicado a um linha de transmissão com três terminais em 230 kV. O modelo do relé de proteção é implementado usando o ambiente MODELS do programa ATP, reproduzindo as lógicas dos diferentes esquemas de distância e a comunicação entre os relés. Foram avaliados os seguintes esquemas de proteção: Transferência de Disparo com Sub-Alcance Direto (DUTT), Transferência de disparo com Sub-Alcance Permissivo (PUTT), Transferência de Disparo com Sobre-Alcance Permissivo (POTT), Bloqueio de Comparação Direcional (DCB) e Desbloqueio de Comparação Direcional (DCUB). Também são discutidos alguns aspectos do desempenho de cada esquema, analisando o efeito das correntes *infeed* e *outfeed*, que são inerentes à proteção de linhas multi-terminais.

Em (ESPINOZA, 2011) se descreve uma metodologia para obter um ambiente interativo de simulação com ferramentas que permitam fazer análises de sistemas de proteção, como estudos

de coordenação e análises pós-defeito. As ferramentas são baseadas no ATP e na linguagem de programação ANSI C, sobre a plataforma de *software* livre GNU/Linux. Um sistema de teste e um relé numérico de distância foram programados, avaliando-se a técnica proposta.

(MOLAS; SILVA, 2012) descreve um modelo de relé digital de proteção diferencial de linhas de transmissão que utiliza o método de detecção de faltas baseado no plano alfa. Aplica-se a técnica do plano- α generalizado que permite proteger sistemas com múltiplos terminais e o uso de lógicas adicionais para elevar a segurança do esquema de proteção. O ATP em conjunto com a MODELS foi usado para simular, modelar e visualizar a dinâmica entre o sistema elétrico de potência e o relé de proteção implementado.

(PANEZ, 2016) apresenta a modelagem e a simulação digital do relé direcional para proteção de linhas de transmissão, implementando três métodos de polarização, sendo estes o método de polarização por tensão, o método de polarização por corrente e o método de impedâncias. Para realizar as análises do desempenho do relé se utilizou o simulador digital ATP, programando os componentes do relé direcional na linguagem MODELS.

Até o momento, nesta seção foram descritos alguns dos modelos de relés digitais de linha baseados em fasores implementados no programa ATP, porém existe uma variedade de trabalhos que tratam do tema. Neste tipo de sistema de proteção o processo de estimação de fasores é fundamental, o que acarreta um atraso intrínseco devido ao processo de janelamento de dados, que varia tipicamente de 1 a 1,5 vezes o período do sinal na frequência industrial. Para evitar maiores atrasos na eliminação do defeito surgem as proteções no domínio do tempo em relés comerciais atuais. Estas proteções, que atualmente são aplicadas para linha de transmissão, apresentam tempos médios de operação na ordem de um quarto de ciclo, além de outras vantagens substanciais que justificam o seu uso como uma nova tendência para os esquemas de proteção.

2.2. PROTEÇÃO BASEADA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Em função da alta capacidade de processamento dos equipamentos disponíveis atualmente, acrescido do fato de que os processadores têm tamanhos cada vez menores e baixo custo, surgem novas técnicas de proteção que ostentam respostas em tempos correspondentes à fração de um ciclo. Soluções no domínio do tempo têm sido desenvolvidas para tornar possíveis operações em

apenas alguns milissegundos, quebrando a barreira de velocidade dos relés tradicionais baseados em fasor, melhorando a segurança em termos de estabilidade durante curto-circuito críticos, aumentando as margens de estabilidade do sistema, minimizando o desgaste do equipamento, melhorando a qualidade da energia entregue e limitando os danos para os componentes do sistema elétrico em geral.

As funções de proteção no domínio do tempo estão baseadas nas teorias de grandezas incrementais (TD: *Time Domain*) e ondas viajantes (TW: *Traveling Waves*). Esses métodos foram projetados para responderem com maior velocidade e segurança, sendo que os elementos de proteção TW87, TD21, TD32 e TW32 são muito confiáveis. Porém, pela própria natureza dos seus princípios de operação, não conseguem cobrir toda a gama de defeitos, por exemplo, quando o defeito ocorre próximo a um valor nulo de tensão como no caso de faltas monofásicas e bifásicas (tensão entre fases nula) (COSTA; SOUZA; BRITO, 2012). Mesmo assim, as vantagens e benefícios que estas novas funções oferecem representam uma grande melhoria em termos de desempenho de proteção de linhas. Os novos algoritmos e lógicas de proteção são complementares aos métodos tradicionais, introduzindo o conceito de relé parceiro, acelerando a resposta da proteção clássica em cenários de faltas mais adversos (SCHWEITZER et al., 2016).

Nesse sentido serão citados alguns dos trabalhos iniciais e recentes que contribuíram com o desenvolvimento dos princípios e lógicas de operação no domínio do tempo, de modo a mostrar que ao longo do tempo o avanço tecnológico foi fundamental para que hoje este tipo de proteção tornasse uma realidade.

(M. CHAMIA, 1978) descreve-se um novo relé de proteção baseado na teoria das TWs que opera a ultra-alta velocidade e pode detectar e determinar a direção do defeito em apenas alguns milissegundos. O princípio do funcionamento do relé, projeto e aplicação são apresentados, bem como os resultados dos estudos de simulação em computador e testes de laboratório. Se descreve a redução dos tempos de eliminação das faltas como uma forma de melhorar a estabilidade do sistema e a capacidade de transferência de energia.

(YAMAMOTO et al., 1979) é aplicada a teoria da TW baseada nas equações de *Bergeron* para proteção de linhas de transmissão monofásicas e trifásicas, ainda tratando as linhas como ideais, ou seja, sem perdas. É demonstrado que o método proposto pode ser aplicado a uma rede de transmissão multi-terminal. Métodos para detectar a fase envolvida na falta e o ponto de falta

também são discutidos. O esquema de proteção proposto é abrangente, podendo detectar a falta interna de forma rápida, além de discriminar a falta externa. O relé proposto pode ser considerado como um relé diferencial baseado em TW.

Em (JOHNS, 1980) é descrito um novo esquema de proteção de linha de ultra-alta velocidade. A base do método é um dispositivo detector direcional muito rápido que compara os sinais proporcionais das tensões e correntes superpostas medidas no ponto do relé. O esquema foi projetado para uso em conjunto com equipamento de comunicação e os tempos de disparos encontram-se na faixa de 2 a 4 ms para a maioria dos defeitos. Apresenta-se o resultado de uma série de testes de laboratório e o trabalho destaca o melhor desempenho do novo esquema após faltas monofásicas resistivas em relação ao observado com as técnicas de relés de distâncias convencionais. A imunidade às oscilações de potência e um alto grau de sensibilidade direcional são outras vantagens elencadas no trabalho.

Embora os métodos iniciais desenvolvidos na década de 70 tenham sido utilizados com sucesso em casos específicos em linhas de transmissão, sua aplicação com a tecnologia daquela época não era suficientemente confiável. Os circuitos internos e a construção dos relés estáticos não atendiam aos requisitos mínimos exigidos pelo sistema de proteção. No entanto, com a chegada da tecnologia digital de sinais e o desenvolvimento de equipamentos de medição com maior capacidade de hardware a partir dos anos 2000, diversos trabalhos no campo das ondas viajantes foram publicados com foco principal na localização de faltas em linhas de transmissão. Porém, recentemente surge um novo interesse das pesquisas que é para o desenvolvimento de técnicas de proteção de linhas com melhor desempenho em termos de velocidade de resposta, segurança e confiabilidade. Alguns desses trabalhos serão apresentados a seguir.

Em (KASZTENNY; VOLOH; MULTILIN, 2006) é mostrada uma função de comparação de fase, a qual é chamada de função PC do termo em inglês *Phase Comparison*. Essa função é capaz de identificar curto-circuitos internos na linha protegida menos de meio ciclo após a ocorrência da falha e independe dos parâmetros da linha. A proteção PC se fundamenta na diferença angular entre as correntes do terminal de envio e remoto. Considerando as polaridades dos transformadores de corrente (TCs), as correntes têm polaridades opostas na ocorrência de faltas externas ou em condições normais de operação, por outro lado, as correntes têm a mesma direção durante faltas internas, resultando em polaridade iguais. No domínio do tempo a

diferença angular é calculada com base no processamento de sinais modulados, cujo comportamento é determinado pela polaridade dos valores instantâneos das correntes medidas nos terminais da linha.

Em (SCHWEITZER et al., 2015) é introduzido o conceito de uma proteção de alta velocidade usando as componentes induzidas pelas falhas na tensão e na corrente, apresentando suas vantagens e a importância para o sistema elétrico de potência. São revisadas as numerosas técnicas de proteção rápidas que foram implementados ao longo do tempo, incluindo elementos direcionais, elementos de subcance de disparo direto, e elementos diferenciais que aceleram significativamente a proteção de linha. Em seguida são propostas novas soluções no domínio do tempo com a tecnologia atual tais como: uma proteção diferencial baseada somente nas correntes de TW, eliminando o requisito de medição de tensão com alta fidelidade, usando comunicações de alta velocidade através de fibra ótica; e um novo elemento direcional que opera com limiares adaptativos baseados na medição das grandezas incrementais que compara as polaridades da tensão incremental e a corrente réplica incremental no domínio do tempo para determinar a direção da falta.

Em (LOPES; LEITE; PAULO, 2016) se realiza uma análise comparativa entre duas funções de proteção aplicadas no domínio do tempo capazes de prover a proteção unitária de linhas de transmissão. Neste trabalho é comparado o novo elemento direcional no domínio do tempo proposto em (SCHWEITZER et al., 2015) com o comparador de fases no domínio do tempo proposto em (KASZTENNY; VOLOH; MULTILIN, 2006). Para avaliar o desempenho das referidas funções de proteção realizaram-se simulações em massa de diversos cenários de falta em um sistema elétrico de 230 kV por meio do programa ATP (*Alternative Transients Program*), mostrando a identificação das vantagens, limitações e fontes de erro de cada algoritmo.

Em (SCHWEITZER et al., 2016) descreve-se um relé que utiliza os princípios de proteção no domínio do tempo, incorpora elementos direcionais baseados em grandezas incrementais e ondas viajantes (TD32 e TW32) em um esquema de disparo assistido por comunicação, elemento de distância baseado em grandezas incrementais e um elemento diferencial baseado em ondas viajantes (TD21 e TW87). O trabalho compartilha alguns detalhes importantes da sua implementação em *hardware*, e ilustra sua operação com dados de falhas reais que incluem faltas

internas em várias linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão, comprimento, níveis de curto-circuito e compensação em série, transformadores de potencial capacitivos (TPCs), e outros fatores. A partir dos registros de oscilografia são capturados os eventos utilizando os relés com altas taxas de amostragem e localizadores de falta baseado em ondas viajantes (TWs). Através de simulações digitais compara-se o desempenho dos elementos tradicionais dos relés direcionais e de distância baseados em fasores com o dos elementos de proteção de linha TD32 e TD21.

(COSTA et al., 2017) propõe uma proteção de linha baseada em TW usando somente o tempo de chegada da primeira onda viajante em cada terminal, conseguindo uma proteção simples, precisa e rápida. São avaliados o efeito da frequência de amostragem e a estimação da velocidade de propagação de ondas, e alguns paradigmas são considerados, como a necessidade de uma alta taxa de amostragem para uma estimação precisa da velocidade de propagação. Dois relés de proteção baseado em TW são implementados e avaliados via simulações em tempo real, permitindo a interação de *Hardware-in-the-Loop* (HIL) considerando equipamentos de comunicação entre os relés. Desta forma a confiabilidade e o tempo de operação da proteção puderam ser avaliados de maneira correta.

(RIBEIRO, 2018) apresenta uma avaliação da proteção diferencial cruzada para linhas de circuito duplo baseada em medições de sinais de ondas viajantes de corrente em apenas um terminal. Como ferramenta de modelagem utiliza-se o programa ATP para simular, modelar e verificar a atuação da proteção para diferentes cenários de falta. O método protege e classifica as fases defeituosas no circuito com falta, identifica também faltas entre os circuitos quando fases de ambos os circuitos estão envolvidas no defeito. O algoritmo extrai as ondas de corrente medidas por ambos os TCs instalados nos terminais monitorados e usa apenas as primeiras frentes de ondas incidentes para implementar sua lógica de disparo da proteção. Os resultados foram obtidos por meio de simulações pontuais e em massa, demonstrando que o método de proteção detecta corretamente diversos cenários de faltas internas poucos milissegundos após a ocorrência do defeito, apresentando boa confiabilidade e sensibilidade.

Em (RIBEIRO; LOPES, 2108) implementa-se e avalia-se de maneira individual os elementos de proteção no domínio do tempo baseados em grandezas incrementais (TD32 e TD21) e ondas viajantes (TD32 e TW87) de um relé moderno comercial. Os algoritmos e as lógicas de proteção de cada elemento são implementados em um programa externo e avaliados de

maneira individual em um sistema de transmissão de circuito simples em 500 kV (duas linhas adjacentes e uma monitorada) e dois circuitos equivalentes Thévenin. O sistema foi modelado no ATP e cinco cenários de falta com diferentes configurações foram estudados. As simulações transitórias de curto-circuito foram selecionadas de forma a abranger cenários de falta ilustrativos no que diz respeito à operação do relé. Concluiu-se que as funções de proteção são de fato rápidas, sendo capazes de prover disparos da ordem de milissegundos. Porém, ressalta-se que tal desempenho é verificado apenas para situações críticas, quando de fato as características dos sinais monitorados deixam evidente a condição de falta na linha.

Em (RIBEIRO et al., 2018) se descreve e implementa um modelo de filtro *Differentiator-Smoother* (DS) no *software* ATP para extrair as TWs de tensão e corrente dos sinais de falta. Nesse artigo se explica o pseudocódigo do filtro DS em linguagem ATP/MODELS usados em relés SEL-T400L reais. Os resultados obtidos mostram que a resposta temporal do bloco de filtro DS no ATP/MODELS proposto é a mesma que a atual disponível nos relés SEL-T400L, podendo assim emular com precisão a resposta do filtro DS do relé durante estudos de transitórios de falta no ATP.

Nesta seção foram descritos trabalhos que tratam da tecnologia no domínio do tempo, como as grandezas incrementais e ondas viajantes. Como foi descrito, o avanço tecnológico teve grande relevância para o desenvolvimento de relés microprocessados com novos algoritmos e lógicas de proteção no domínio do tempo. Portanto, surge a necessidade de implementar modelos computacionais que avaliem o seu desempenho através de uma análise rigorosa para diferentes condições do defeito e do sistema elétrico, interagindo através de simulações em malha fechada (*Software in the loop* - SIL).

Portanto, esta pesquisa foca-se na implementação dos algoritmos e lógicas de proteção de um relé digital com princípios de operação no domínio do tempo baseado no relé moderno SEL-T400L (SEL, 2017), assim como a aquisição e o processamento dos sinais envolvidos (tensão e corrente). No entanto, é importante ter em conta que os recentes relés comerciais implementados em *hardware* asseguram um disparo de fato rápido comparado com o relé tradicional baseado em fasor durante curto-circuito críticos, que são perigosos em termos de estabilidade do sistema. Isto justifica a tendência dos atuais sistemas de proteção que possuem os dois tipos de relés operando

em paralelo, garantindo a segurança e confiabilidade do esquema para situações de falhas menos críticas, e velocidade para os defeitos mais difíceis para a rede elétrica.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA PROTEÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

3.1. FUNDAMENTOS DE DESEMPENHO DE PROTEÇÃO DE LINHAS

As características: velocidade, segurança, confiabilidade e sensibilidade dos elementos de proteção de linha dependem de várias condições do sistema e do defeito, tais como nível de curto-circuito, resistência da falha, distância à falha, tipo de defeito, ponto na onda de tensão (ângulo de incidência), por exemplo.

A segurança da proteção pode ser definida por como: nenhuma operação deve ocorrer para todos os eventos que estejam fora da zona protegida. A velocidade é mais difícil de quantificar porque os tempos mínimos, médios e máximos dependem das condições do sistema elétrico e do defeito. Confiabilidade e sensibilidade são ainda mais ambíguas, por exemplo, sabe-se que o elemento de distância convencional responde para faltas francas, mas acabariam sem operar ao não ver uma falha de elevada resistência. Portanto, qualquer confiabilidade definida numericamente teria que incluir uma relação complexa entre a resistência de falta, localização da falta, impedâncias dos sistemas, e fluxo de carga. Como tal, seria específico do caso e não quantificaria a sensibilidade em geral.

Os elementos de proteção de linha baseado em fasor não são muito afetados pelos desafios tradicionais associados à quantificação do desempenho de relés de proteção de linha. Espera-se alta confiabilidade desses elementos, com um tempo de resposta típico na ordem de um a um ciclo e meio (16,67 a 25 ms em sistemas de 60 Hz). Os relés baseados em fasores utilizam filtragem passa-banda para extrair os componentes de frequência fundamental de tensões e correntes, amortecendo os transitórios de modo que o relé seja imune ao conteúdo de alta

frequência. Como resultado, esses relés são relativamente tolerantes a erros de teste, desde que os componentes de corrente e tensão na frequência fundamental representem eventos reais do sistema de potência.

Atualmente testemunha-se o surgimento de novos relés de proteção de linha de ultra-alta velocidade (UAV) com princípios operacionais no domínio do tempo (SCHWEITZER et al., 2017). Para operar a tais velocidades é preciso trabalhar com um largo espectro de frequência para detectar as mudanças nos sinais monitorados.

Devido à velocidade com que os relés de proteção de linha no domínio do tempo operam, os tempos reais de disparo dependem mais dos tempos de processamento do relé, dos tempos de propagação das ondas viajantes e das comunicações ópticas. Porém, as condições de falta e as condições do sistema têm um impacto maior na confiabilidade destes elementos de proteção de linha.

3.2. GRANDEZAS INCREMENTAIS

A premissa das grandezas incrementais é que elas contêm somente os componentes de tensões e correntes induzidas pelas faltas. Portanto, são intuitivamente entendidas como a diferença entre as tensões e corrente de falta e seus valores pré-falta, como consequência, o termo ‘grandezas incrementais’ é um termo amplo que pode ser aplicado segundo o tipo de filtragem que é utilizado em uma proteção específica. São citados alguns deles:

- *Grandeza Incremental Instantânea* é obtida subtraindo-se o valor presente de falta e o valor de pré-falta memorizado no domínio do tempo. Como tal, esta grandeza incremental contém todos os componentes de frequência presentes no sinal de falta, incluindo o nível CC de decaimento exponencial, a componente de frequência fundamental e os transitórios de alta frequência. Esse tipo de grandeza incremental contém a maior quantidade possível de informação. Em (SEL, 2017) usa-se esse tipo de grandeza incremental com um *buffer* de memória de um ciclo (16,67 ms em sistemas de 60 Hz).
- *Grandeza Incremental Fasorial* é obtida subtraindo-se o valor presente de falta e o valor pré-falta memorizado no domínio da frequência. Desta forma, a grandeza incremental é um fasor que usa filtragem passa-banda para reter intencionalmente apenas a informação dos componentes de frequência fundamental presentes nas grandezas de falta a custo da

latência e da operação mais lenta. Usando um *buffer* de memória de um ciclo (16,67 ms em sistemas de 60 Hz), por exemplo, a grandeza incremental somente é válida durante esse período de tempo, sendo atualizada no próximo ciclo (janela deslizante). Na implementação (SEL, 2011) obtém-se este tipo de grandeza incremental usando um filtro Fourier com um *buffer* de memória de dois ciclos.

- *Grandeza Incremental de Alta Frequência* é obtida por meio da filtragem passa-alta do sinal de entrada. Como tal, esta grandeza incremental contém componentes de alta frequência, excluindo a informação de frequência fundamental presente no sinal de falta. Usando a filtragem passa-alta, esse tipo de sinal incremental é de curta duração (alguns milissegundos, na melhor das hipóteses), e surge a cada mudança brusca no sinal de entrada. Uma grandeza incremental de alta frequência é relativamente fácil de obter usando a tecnologia de relé estático, portanto, foi usada em implementações iniciais de relés de UAV (ENGLER et al., 1985; M. CHAMIA, 1978; VITINS; BOVERI, 1981). Dependendo do limite superior do espectro de frequência pode-se referir ao sinal obtido através da filtragem passa-alta como uma ‘grandeza incremental’ (o espectro está na faixa de até alguns kHz) ou uma ‘onda viajante’ (o espectro está na faixa de até algumas centenas de kHz).

As ondas viajantes são tecnicamente uma forma de grandeza incremental, no entanto, elas carregam informações importantes em seus tempos de chegada, polaridades e magnitudes relativas. Para extrair essas características no domínio do tempo com resolução de microssegundos é usada técnica de diferenciação combinada com suavização (*differentiator-smoother*). Essa abordagem foi usada pela primeira vez na localização de faltas em um sistema HVDC descrito em (ANDO; SCHWEITZER; BAKER, 1985), e também em aplicações recentes de sistemas reais para proteção, localização e monitoramento preditivo de faltas em linhas de transmissão como mostrada em (SHARMA; MYNAM, 2019).

3.2.1. PRINCÍPIO DE SUPERPOSIÇÃO E TEOREMA DE THEVENIN

O teorema de Thevenin e o teorema da superposição permitem analisar o comportamento de uma rede sob falta como duas redes separadas, uma rede pré-falta que contém as tensões e correntes pré-falta, e uma rede puramente faltosa que contém os componentes induzidos pelas

faltas. Como representado na Figura 3.1, a rede faltosa em qualquer momento é a soma das tensões e correntes pré-falta e as induzidas pelas faltas.

Antes do defeito, a rede puramente faltosa não se encontrava energizada e, portanto, todos os valores de tensão e corrente eram zero. Quando ocorrer um defeito esta rede passa por um estado transitório e finalmente se estabelece o estado sustentado (ou temporário) da falta. Nesse estado pode-se analisar a rede puramente faltosa, constituída pelas grandezas incrementais, para valores instantâneos ou para valores fasoriais, como se descreveu na seção anterior. Portanto, como os sinais da rede sob falta são a soma das grandezas de pré-falta e as induzidas pelas faltas, segundo o teorema de superposição os sinais da rede puramente faltosa são a diferença entre os sinais sob falta e os sinais pré-falta.

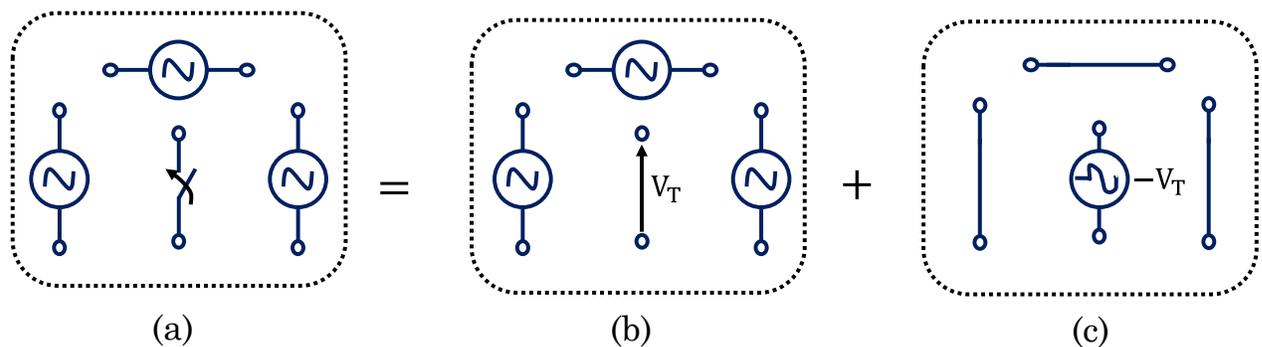


Figura 3.1: Teorema de superposição, (a) Rede sob falta, (b) rede pré-falta, (c) rede puramente faltosa

Uma característica que exhibe as grandezas incrementais, segundo a rede puramente faltosa da Figura 3.1, é que não são afetadas pela carga, mas sim pela fonte Thevenin da rede pré-falta no ponto de falha. Portanto, dependem apenas dos parâmetros da rede e o único efeito das fontes do sistema de potência e do fluxo de carga é estabelecer as condições iniciais para a fonte de superposição (Thévenin).

Por outro lado, para calcular essas grandezas incrementais é preciso ter medições dos sinais de falta e pré-falta. Os sinais de falta são medidos pelo relé de proteção diretamente nos seus terminais, e os sinais pré-falta podem ser memorizados através de um *buffer* que armazena as amostras no tempo, de modo que estejam disponíveis no instante do defeito. Estas amostras são válidas apenas por algumas dezenas de milissegundos, já que as fontes do sistema de energia permanecem apenas estacionárias por um curto período de tempo. Por conseguinte, um método

simples para derivar grandezas incrementais, como o proposto em (SCHWEITZER et al., 2015) é:

$$\Delta s_{(t)} = s_{(t)} - s_{(t-pT)} \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta s_{(t)}$: é a grandeza incremental instantânea

s : é o valor medido instantâneo

T é o período da grandeza medida

p : é o número de períodos arbitrário

Usando (3.1) obtém-se uma grandeza incremental que dura p ciclos da frequência fundamental (60 Hz). Após esse período essa grandeza se anula porque os valores históricos subtraídos são inseridos no período de falta. O valor selecionado nesta pesquisa foi de um ciclo, $p = 1$.

3.2.2. RELAÇÃO DAS TENSÕES E CORRENTES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Pode-se considerar a rede RL monofásica da Figura 3.2, com uma falta no ponto F à distância ‘ m ’ em pu do terminal S, onde o valor de ‘ m ’ é calculado com respeito à impedância total da linha com parâmetros R_L e L_L entre os terminas S e R; também considerar duas fontes equivalentes local e remota com parâmetros R_{1S} , L_{1S} e R_{1R} , L_{1R} , respectivamente. A rede puramente faltosa da Figura 3.3 contém as tensões e correntes que serão usadas para explicar os princípios da proteção no domínio do tempo.

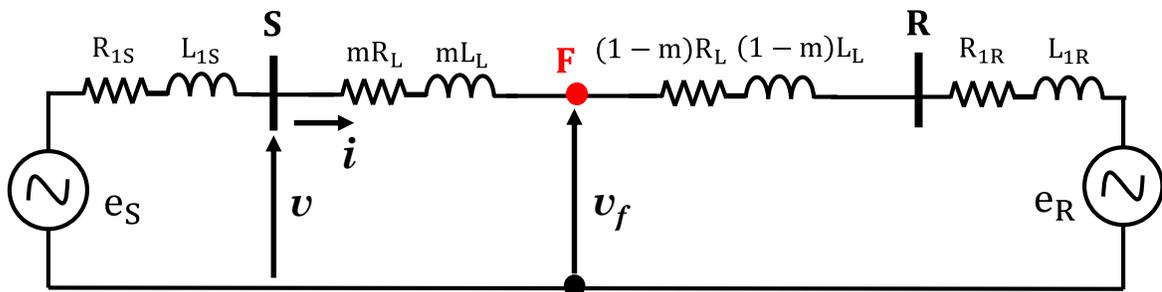


Figura 3.2: Sistema monofásico simples com duas fontes e uma falta em F

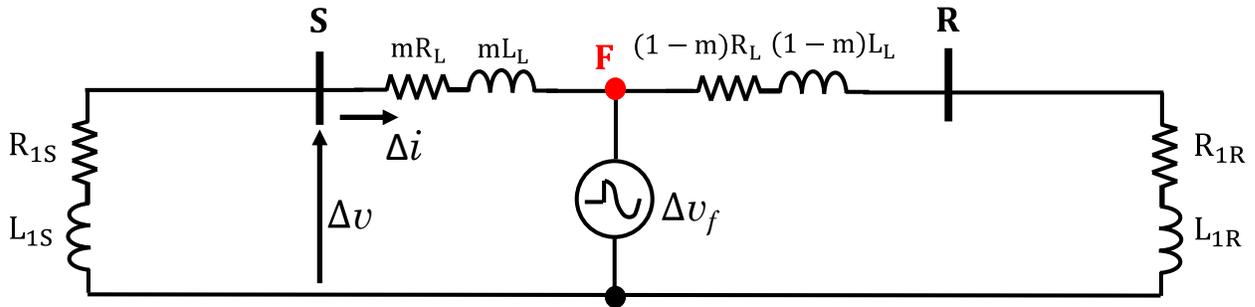


Figura 3.3: Rede puramente faltosa do sistema da Figura 3.2 para análises das grandezas incrementais

Assumindo um relé localizado no barramento S, as grandezas incrementais da tensão e corrente no domínio do tempo são relacionadas por uma equação de queda de tensão na resistência e indutância da fonte S.

$$\Delta v = -(R_{1S} \cdot \Delta i + L_{1S} \cdot \frac{d\Delta i}{dt}) \quad (3.2)$$

Conforme (3.2), no domínio do tempo, a relação entre a corrente e tensão são governadas por equações diferenciais e não por equações algébricas como no domínio da frequência, que usa fasores. Para contornar esta dificuldade se utiliza uma corrente de réplica, multiplicando e dividindo o lado direito de (3.2) por um escalar, sendo este o módulo da impedância da fonte, $|\bar{Z}_{1S}|$:

$$\Delta v = -|\bar{Z}_{1S}| \left(\frac{R_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \cdot \Delta i + \frac{L_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \cdot \frac{d\Delta i}{dt} \right) \quad (3.3)$$

Aparecendo um novo termo dentro do parêntesis que é a combinação da corrente incremental instantânea e sua derivada, chamada de ‘corrente de réplica’.

$$\Delta i_z = D_0 \cdot \Delta i + D_1 \cdot \frac{d\Delta i}{dt} \quad (3.4)$$

Onde:

$$D_0 = \frac{R_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \text{ e } D_1 = \frac{L_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \quad (3.5)$$

O novo termo, Δi_z , foi usado na proteção no domínio do tempo desenvolvida em (SCHWEITZER et al., 2015), e tem a propriedade de ser imune ao decaimento exponencial CC. Além disso, segundo o reportado em (SILVA; LOPES; SILVA, 2018), aprimora os tempos de

operação. O cálculo de Δi_z se assemelha à aplicação do filtro mímico digital reportado em (BENMOUYAL, 1995).

Reescrevendo a equação (3.3) de tensão-corrente para grandezas incrementais medidas no terminal S:

$$\Delta v = -|\bar{Z}_{1S}| \cdot \Delta i_z \quad (3.6)$$

A derivada dessa equação só é válida para circuitos RL, representando a linha e o sistema equivalente. Equação (3.7) apresenta o mesmo formato da expressão, porém, agora no domínio da frequência:

$$\Delta \dot{V} = -\bar{Z}_{1S} \cdot \Delta \dot{I} \quad (3.7)$$

Portanto, pode-se resolver a rede sob falta com valores no domínio do tempo ou no domínio da frequência (técnicas tradicionais). Com o objetivo de acelerar a função da proteção proporcionada pelo relé, adota-se a solução no domínio do tempo, evitando-se atrasos relacionados à janela de observação para a estimação do fasor. Nesse sentido pode-se escrever a corrente de réplica de uma forma mais genérica como segue:

$$\Delta i_z = f_{IZ}(\Delta i, R_{1S}, L_{1S}) = D_0(R_{1S}, L_{1S}) \cdot \Delta i + D_1(R_{1S}, L_{1S}) \cdot \frac{d\Delta i}{dt} \quad (3.8)$$

Para transformar a corrente de réplica no domínio do tempo para o domínio da frequência, a fim de realizar os cálculos da rede sob falta em estado estacionário, se trabalha com a transformada de Laplace de (3.4) da seguinte forma:

$$\Delta \dot{I}_z = \frac{R_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \cdot \Delta \dot{I} + \frac{j\omega L_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \cdot \Delta \dot{I} = \frac{|\bar{Z}_{1S}| \angle Z_{1S}}{|\bar{Z}_{1S}|} \cdot \Delta \dot{I} = \Delta \dot{I} \angle Z_{1S} \quad (3.9)$$

Com as equações desenvolvidas até agora se expandirá o conceito monofásico de corrente de réplica para incluir os *loops* de falta adequados para fornecer uma proteção completa contra faltas em sistemas trifásicos. Para o cálculo dos *loops* de falta nos relés tradicionalmente são criados *loops* de corrente e tensão, de modo que nas equações desenvolvidas pelo relé apareça a impedância sequência positiva da linha. No caso de relés no domínio do tempo, a tensão

incremental instantânea e a corrente de réplica incremental são relacionadas com a magnitude da impedância de sequência positiva da linha.

Então, o *loop* de corrente de terra no domínio da frequência é derivado, assumindo uma falta franca para terra, por exemplo, fase A para terra (AT) em um sistema radial. Logo, considerando-se as conexões das redes de sequência positiva, negativa e zero, a tensão na localização do relé é dada por:

$$\dot{V}_A = \bar{Z}_{1L} \cdot \dot{I}_1 + \bar{Z}_{1L} \cdot \dot{I}_2 + \bar{Z}_{0L} \cdot \dot{I}_0 \quad (3.10)$$

Onde \dot{I}_0 , \dot{I}_1 e \dot{I}_2 são as correntes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente; e \bar{Z}_{0L} , \bar{Z}_{1L} e \bar{Z}_{2L} são as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente. Assumindo que $\bar{Z}_{1L} = \bar{Z}_{2L}$.

A partir do equacionamento (3.10) deriva-se a corrente de *loop* que resulta em uma impedância aparente igual à impedância da linha de sequência positiva, \bar{Z}_{1L} , como segue:

$$\dot{V}_A = \bar{Z}_{1L} \cdot \dot{I}_A - (\bar{Z}_{1L} - \bar{Z}_{0L}) \cdot \dot{I}_0 \quad (3.11)$$

$$\dot{V}_A = \bar{Z}_{1L} \cdot [\dot{I}_A - (1 - \frac{\bar{Z}_{0L}}{\bar{Z}_{1L}}) \cdot \dot{I}_0] \quad (3.12)$$

A corrente de *loop* de terra da fase A, \dot{I}_{AT} , é então o termo entre colchetes em (3.12). O termo na frente de \dot{I}_0 é o conhecido fator de compensação de sequência zero, $3 k_0$. Para converter essa corrente de *loop* em um *loop* de corrente de réplica, \dot{I}_{ZAG} , se associa o ângulo da impedância com o termo da corrente como segue:

$$\dot{I}_{ZAG} = \dot{I}_A \angle Z_{1L} - \dot{I}_0 (1 \angle Z_{1L} - \frac{|\bar{Z}_{0L}|}{|\bar{Z}_{1L}|} \angle Z_{0L}) \quad (3.13)$$

Reescrevendo (3.13) em sua forma de domínio do tempo, invocando o formato da função (3.8), tem-se que:

$$i_{ZAG} = f_{IZ}(i_A, R_{1L}, L_{1L}) - [f_{IZ}(i_0, R_{1L}, L_{1L}) - \frac{|\bar{Z}_{0L}|}{|\bar{Z}_{1L}|} \cdot f_{IZ}(i_0, R_{0L}, L_{0L})] \quad (3.14)$$

Logo substituem-se simplesmente em (3.14) a corrente de fase A, a corrente de *loop* de terra da fase A e a corrente homopolar (sequência zero) pelas suas grandezas incrementais da rede puramente faltosa, resultando em:

$$\Delta i_{ZAG} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_{1L}, L_{1L}) - [f_{IZ}(\Delta i_0, R_{1L}, L_{1L}) - \frac{|\bar{Z}_{0L}|}{|\bar{Z}_{1L}|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_{0L}, L_{0L})] \quad (3.15)$$

No caso de faltas multifásicas, os *loops* de fases das tensões e correntes por fase no domínio da frequência também são derivadas de maneira que apareça nas equações do relé a impedância da linha de sequência positiva. Essas grandezas de *loop* são derivadas assumindo uma falta fase-fase franca em um sistema radial e considerando-se as conexões da rede de sequência positiva e negativa para uma falta BC. Portanto, para a localização do relé define-se.

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = \bar{Z}_{1L} \cdot \dot{I}_1 - \bar{Z}_{1L} \cdot \dot{I}_2 \quad (3.16)$$

A tensão \dot{V}_{BC} e a corrente \dot{I}_{BC} estão relacionadas de acordo com:

$$\dot{V}_{BC} = \bar{Z}_{1L} \cdot \dot{I}_{BC} \quad (3.17)$$

A Equação (3.17) apresenta a tensão e corrente do *loop* entre as fases BC e mostra como elas estão relacionadas pela impedância de linha de sequência positiva. Novamente, se converte a corrente de *loop* em uma corrente de réplica de *loop* associando o ângulo da impedância com o termo da corrente.

$$\dot{V}_{BC} = |\bar{Z}_{1L}| \cdot \dot{I}_{BC} \angle Z_{1L} \quad (3.18)$$

$$\dot{V}_{BC} = |\bar{Z}_{1L}| \cdot \dot{I}_{ZBC} \quad (3.19)$$

$$\dot{I}_{ZBC} = \dot{I}_B \angle Z_{1L} - \dot{I}_C \angle Z_{1L} \quad (3.20)$$

Converte-se a corrente de réplica do *loop* no domínio da frequência na sua forma no domínio do tempo usando o formato da função (3.8).

$$i_{ZBC} = f_{IZ}(i_B, R_{1L}, L_{1L}) - f_{IZ}(i_C, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.21)$$

A forma incremental do *loop* da corrente de réplica BC substitui as grandezas da rede sob falta pelas grandezas incrementais da rede puramente faltosa.

$$\Delta i_{ZBC} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_{1L}, L_{1L}) - f_{IZ}(\Delta i_C, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.22)$$

Após obter as tensões e correntes incrementais dos *loops* definem-se os seguintes sinais para todas as grandezas incrementais de *loop* de fase e de terra no domínio do tempo.

$$\Delta i_0 = \frac{1}{3}(\Delta i_A + \Delta i_B + \Delta i_C) \quad (3.23)$$

$$\Delta i_{Z0} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_{1L}, L_{1L}) - \frac{|\bar{Z}_{0L}|}{|\bar{Z}_{1L}|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_{0L}, L_{0L}) \quad (3.24)$$

$$\Delta i_{ZA} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.25)$$

$$\Delta i_{ZB} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.26)$$

$$\Delta i_{ZC} = f_{IZ}(\Delta i_C, R_{1L}, L_{1L}) \quad (3.27)$$

Finalmente podem ser formadas as tensões e correntes de réplica incremental no formato do domínio do tempo, conforme apresentado na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Loops das tensões e correntes de réplica incrementais no domínio do tempo

<i>Loop</i>	Tensão Δv	Corrente de réplica, Δi_z
AT	Δv_A	$\Delta i_{ZA} - \Delta i_{Z0}$
BT	Δv_B	$\Delta i_{ZB} - \Delta i_{Z0}$
CT	Δv_C	$\Delta i_{ZC} - \Delta i_{Z0}$
AB	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$\Delta i_{ZA} - \Delta i_{ZB}$
BC	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$\Delta i_{ZB} - \Delta i_{ZC}$
CA	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{ZC} - \Delta i_{ZA}$

3.2.3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DIRECIONAL TD32

O princípio operacional da proteção direcional baseado nos componentes induzidos pelos defeitos foi originalmente explorado por (M. CHAMIA, 1978). Nos relés modernos, como na implementação de (SEL, 2017), o princípio é chamado de TD32 e provê rapidez, segurança, e uma função direcional bastante confiável, usando sinais na faixa de centenas de Hz (GUZMÁN et al., 2018).

O elemento TD32 baseia-se no valor negativo do produto da tensão incremental instantânea (Δv) e a corrente de réplica incremental instantânea (Δi_z). O resultado é chamado de torque por analogia aos relés eletromecânicos, e essa grandeza de operação é chamada de torque operante (S_{op}) e sua polaridade depende da localização do defeito com respeito à localização do relé, como mostrado na Figura 3.4. Para faltas à frente do relé o torque operante possui polaridade positiva ($S_{op} > 0$), e no caso de falta reversa possui polaridade negativa ($S_{op} < 0$). Além disso, a amplitude da tensão incremental instantânea é $|\bar{Z}_{1S}|$ vezes a amplitude da corrente de réplica

instantânea para faltas à frente do relé, e $|\bar{Z}_{1L} + \bar{Z}_{1R}|$ vezes a amplitude da corrente de réplica instantânea para faltas reversas ao relé.

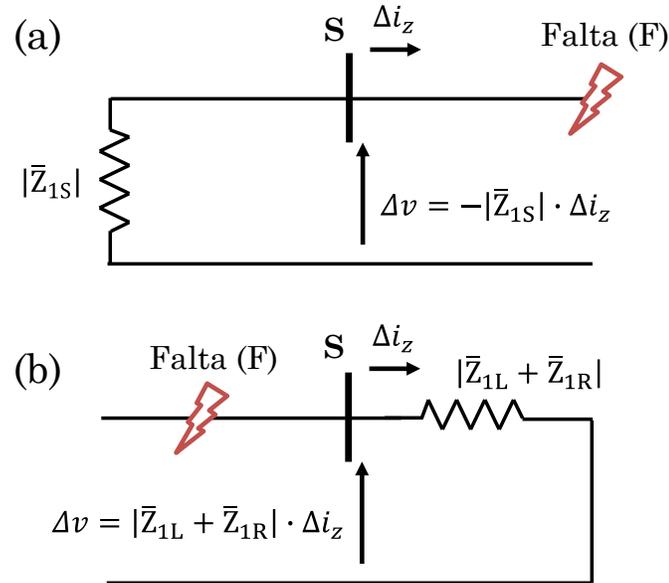


Figura 3.4: Princípio de operação TD32: (a) Falta à frente e (b) Falta Reverso

A rede elétrica da Figura 3.4 é usada para descrever as relações (3.28) e (3.29) para faltas à frente e reversa, respectivamente, ao relé localizado no barramento S.

$$\Delta v = -|\bar{Z}_{1S}| \cdot \Delta i_z \quad (3.28)$$

$$\Delta v = |\bar{Z}_{1L} + \bar{Z}_{1R}| \cdot \Delta i_z \quad (3.29)$$

Essas relações são válidas para qualquer instante de tempo, como é apresentado na Figura 3.5. A tensão incremental e a corrente de réplica incremental têm formas de ondas similares, suas polaridades relativas indicam a direção do defeito, e a relação de amplitude depende das impedâncias do sistema e da direção da falta.

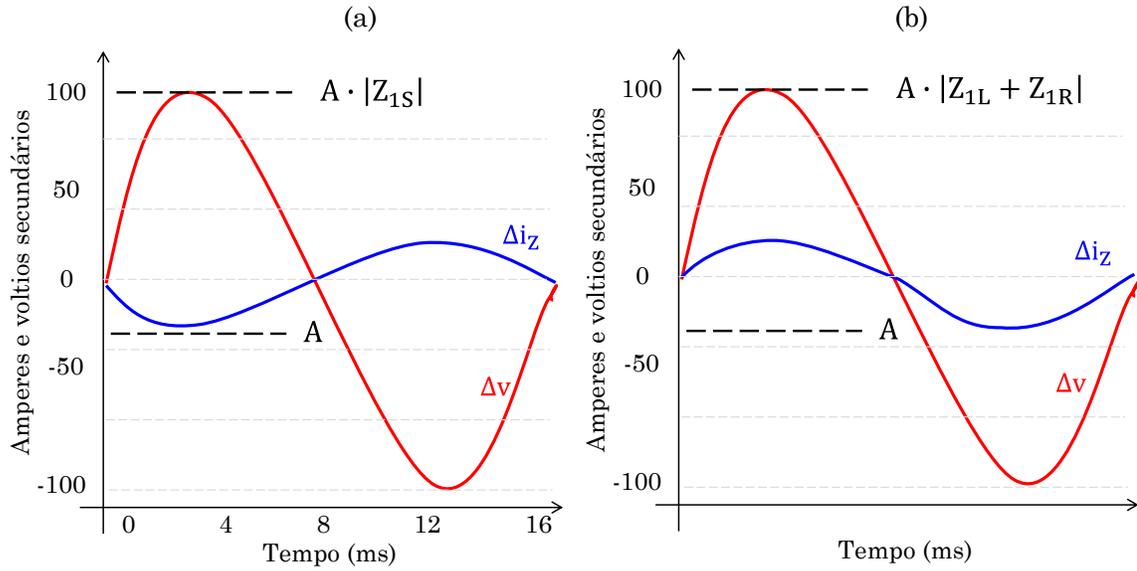


Figura 3.5: Sinais de tensão e corrente de réplica incremental instantâneos para faltas à frente (a) e reversa (b)

O torque operante é definido como o valor negativo do produto da tensão incremental e a corrente de réplica incremental instantânea:

$$S_{OP} = -\Delta v \cdot \Delta i_z \quad (3.30)$$

Substituindo (3.28) em (3.30) obtém-se a expressão de S_{OP} para faltas à frente:

$$S_{OP} = -|\bar{Z}_{1S}| \cdot (\Delta i_z)^2 \quad (3.31)$$

De modo similar, usando (3.29) em (3.30) se obtém a expressão para faltas reversas.

$$S_{OP} = |\bar{Z}_{1L} + \bar{Z}_{1R}| \cdot (\Delta i_z)^2 \quad (3.32)$$

Teoricamente o elemento direcional pode apenas comparar o valor S_{OP} com relação à zero para determinar a direção do defeito. No entanto, pode-se aproveitar (3.31) e (3.32) para melhorar a confiabilidade e a segurança desse elemento, comparando o torque operante (S_{OP}) com dois limiares adaptativos, S_{FWD} e S_{REV} , chamados de torque de restrição à frente e reverso, respectivamente, definidos por:

$$S_{FWD} = -|TD32ZF| \cdot (\Delta i_z)^2 \quad (3.33)$$

$$S_{REV} = +|TD32ZR| \cdot (\Delta i_z)^2 \quad (3.34)$$

Onde: TD32ZF e TD32ZR são ajustes do relé. Conforme apresentado em (KASZTENNY et al., 2016), neste trabalho se utilizou:

$$TD32ZF = 0,3 \cdot \text{MIN}|\bar{Z}_{1S}| \quad (3.35)$$

$$TD32ZR = 0,3 \cdot |\bar{Z}_{1L}| \quad (3.36)$$

Portanto, o elemento declara que uma falta está na direção à frente do relé quando:

$$S_{OP} > S_{FWD} \quad (3.37)$$

E o elemento declara uma falta na direção reversa do relé quando:

$$S_{OP} < S_{REV} \quad (3.38)$$

As equações (3.37) e (3.38) são satisfeitas para cada amostra do período transitório de falta quando a filtragem adequada é aplicada. Na Figura 3.6 ilustra-se o princípio para uma falta à frente. O torque operante é positivo conforme o esperado, e o torque de restrição à frente (S_{FWD}) é positivo para metade do sinal operacional, garantindo uma operação confiável. Além disto, o torque de restrição reverso (S_{REV}) é negativo, garantindo uma margem de segurança adequada.

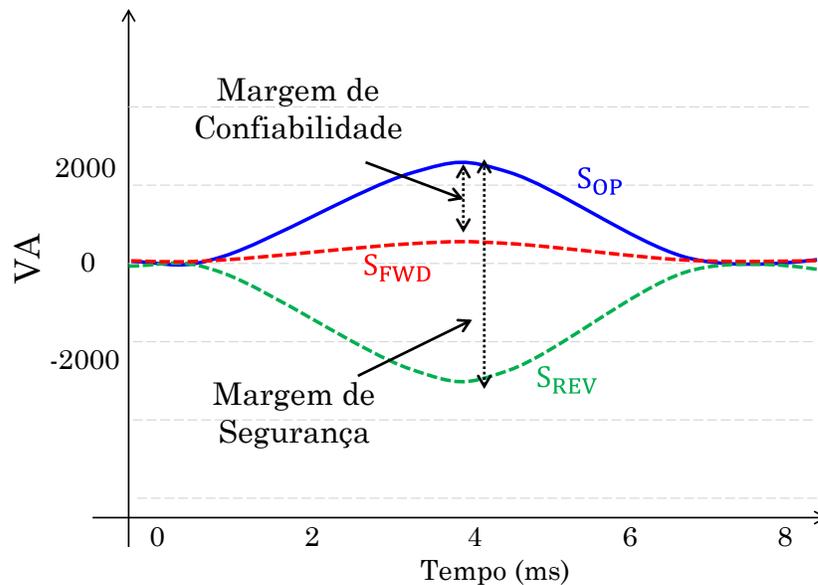


Figura 3.6: Torque operante e torques de restrição à frente e reverso do elemento direcional TD32 para uma falta à frente

3.2.4. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DE DISTÂNCIA TD21

Na referência (SCHWEITZER et al., 2015) descreve-se o elemento de distância (TD21) baseado nos fundamentos de (VITINS; BOVERI, 1981). O princípio básico é a comparação da

variação entre a tensão incremental calculada no ponto de alcance pretendido (tensão de operação chamada V_{21OP}) com a tensão pré-falta no ponto de alcance (tensão de restrição chamada V_{21RST}). O elemento de distância baseado em grandezas incrementais é chamado de TD21 na implementação (SEL, 2017) e fornece proteção instantânea de linha com sub-alcance.

A condição de operação do elemento é definida considerando que a tensão pré-falta é o valor mais alto possível da mudança de tensão no ponto de falta (falta franca, $R_f = 0 \Omega$). Com referência à Figura 3.7, se a mudança calculada da tensão no ponto de alcance (V_{21OP}) for maior do que a tensão pré-falta no ponto de alcance (V_{21RST}), a falta deve estar mais próxima do que o alcance ajustado, m_1 . Se isto ocorrer o elemento está autorizado a operar, assumindo que o elemento direcional TD32 declarou um evento à frente e que as outras condições de segurança adicionais sejam atendidas (SCHWEITZER et al., 2016).

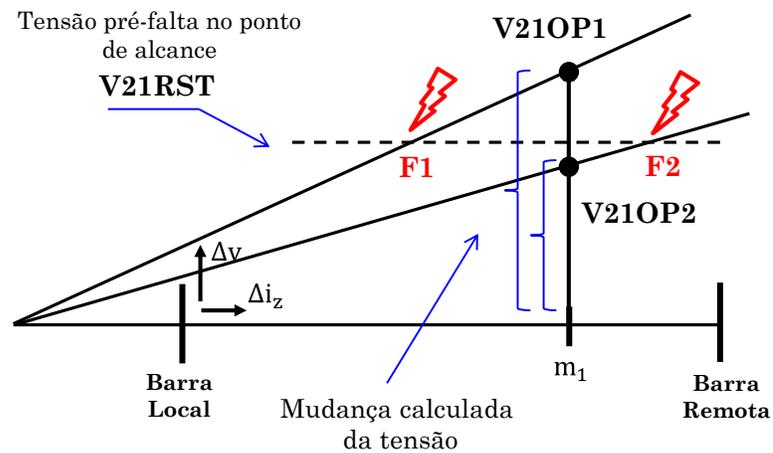


Figura 3.7: Princípio de operação do elemento de sub-alcance TD21 para faltas em sua zona protegida (F1) e fora da sua zona (F2)

Por exemplo, quando ocorre uma falta além do alcance ajustado (m_1), ponto F2, a mudança da tensão calculada no ponto de alcance (V_{21OP2}) é menor do que a tensão pré-falta no ponto de alcance (V_{21RST}). Quando ocorre uma falta a montante (antes) do alcance ajustado, ponto F1, a mudança da tensão calculada no ponto de alcance (V_{21OP2}) é maior do que a tensão de pré-falta no ponto de alcance (V_{21RST}).

A tensão de operação do elemento TD21, V_{21OP} , é calculada por:

$$V_{21OP} = \Delta v - m_1 \cdot |\bar{Z}_{1L}| \cdot \Delta i_z \quad (3.39)$$

Para conseguir uma precisão no ponto de alcance desejado é usado um nível de filtragem na ordem de centenas de Hz. Na presente pesquisa foi adotado 180 Hz.

Para calcular a tensão instantânea no ponto de alcance faz-se uso dos sinais de tensão e corrente de réplica instantâneos:

$$V_{21RST} = v - m_1 \cdot |\bar{Z}_{1L}| \cdot i_Z \quad (3.40)$$

Sabe-se que a tensão de restrição calculada com (3.40) não é perfeitamente precisa. No entanto, é uma boa aproximação da tensão real no ponto de alcance. Naturalmente, precisa-se conhecer o valor pré-falta de (3.40) para representar a tensão no ponto de alcance antes do defeito.

Na Figura 3.8 ilustra-se a metodologia do cálculo da tensão de restrição, VR_{ST21} , (SCHWEITZER et al., 2016; SCHWEITZER; KASZTENNY, 2018). O objetivo é criar um sinal que envolva a tensão do ponto de alcance real e considere várias fontes de erros, mas que seja o menor possível para manter a velocidade e a sensibilidade inerentes à implementação no domínio do tempo. Da Figura 3.8(b) tem-se um nível de restrição mínimo que é o menor valor de V_{21RST} associado aos valores de tensão pré-falta no ponto de alcance próximos do cruzamento por zero. Nesta pesquisa se adotou o valor da tensão nominal do sistema (V_{SYS}) multiplicado por um fator k ligeiramente maior do que um.

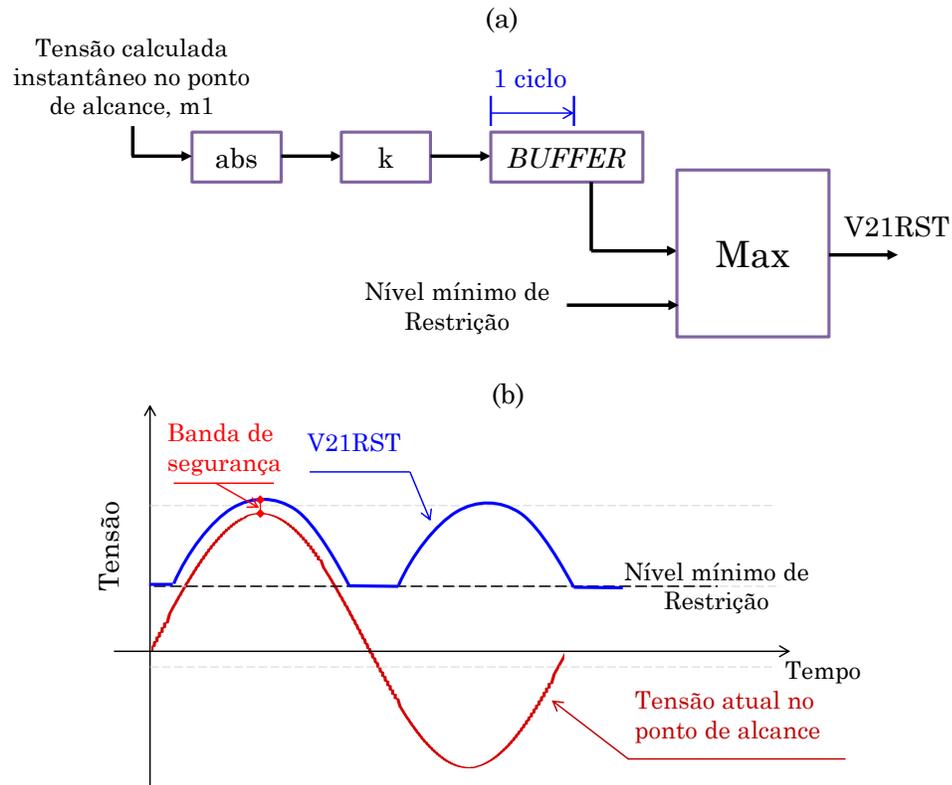


Figura 3.8: Cálculo do sinal de restrição ($V21RST$) do elemento TD21: diagrama lógico (a) e exemplo de operação no tempo (b)

Depois de calcular os sinais de operação e de restrição, os valores absolutos desses sinais são comparados para determinar se $V21OP$ é superior à $V21RST$. Além disso, para melhorar a segurança do elemento TD21, a lógica compara esses sinais considerando as seguintes restrições:

- Se o sinal de restrição ($V21RST$) for positivo o defeito ocorreu no semi-ciclo positivo da onda de tensão, e a tensão se moverá em direção à zero em resposta à falta. Neste caso, a mudança incremental da tensão é negativa.
- Se o sinal de restrição ($V21RST$) for negativo o defeito ocorreu no semi-ciclo negativo da onda de tensão, e a tensão se moverá em direção a zero em resposta à falta. Neste caso, a mudança incremental da tensão é positiva.

Então, para que o elemento seja ainda mais seguro é preciso que o valor absoluto do sinal de operação ($V21OP$) seja maior do que o valor absoluto do sinal de restrição ($V21RST$), e que também que os dois sinais tenham polaridades opostas.

3.3. PROTEÇÃO DE LINHA BASEADA EM ONDA VIAJANTE

Um defeito em uma linha de transmissão aérea, como mostrado na Figura 3.9, em pontos específicos da onda de tensão, causa transitórios de alta frequência que trafegam a uma velocidade ligeiramente abaixo da velocidade da luz ($v_c = 300 \text{ km/ms}$), por exemplo, $0,983 \cdot v_c$, para a linha estudada, e se propaga em ambas as direções a partir da localização de falta. Essas mudanças abruptas no sinal podem ser registradas nos terminais da linha, com tempos de subida na ordem de alguns microssegundos, as quais são chamadas de ondas viajantes.

As ondas viajantes se refletem e refratam nos pontos de descontinuidade ou transição (S, R), dependendo dos valores da impedância características da linha e da impedância de terminação da rede adjacente. Eles podem ser medidas nos terminais através de relés de proteção que tenham a capacidade de operar com altas taxas de amostragem na ordem de MHz, o suficiente para detectar sua banda de energia útil (20 kHz a 400 kHz) (MARX et al., 2013), para definir, por exemplo, a detecção, a direção e localização da falha.

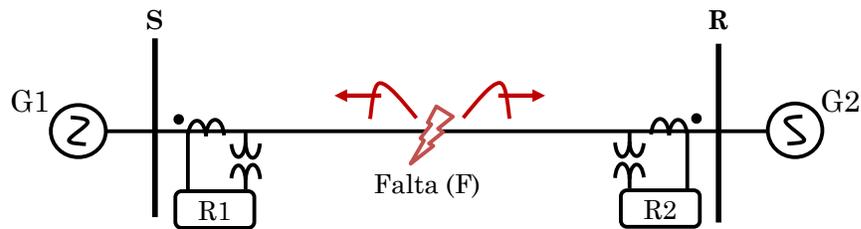


Figura 3.9: Propagação das Ondas Viajantes em ambas direções desde o ponto de falta (F)

No entanto, os equipamentos de medição tradicionais para linhas de alta tensão apresentam resposta adequada para a frequência nominal do sistema elétrico, com valores padrão de 50 Hz ou 60 Hz. Desta forma, eles não foram projetados para medir sinais nas altas frequências, como as ondas viajantes. Mesmo assim, os transformadores de corrente (TCs) convencionais apresentam uma resposta aceitável nas altas frequências. Segundo os resultados de medição de largura de banda dos TCs relatados na literatura especializada, estes equipamentos podem reproduzir sinais com frequência entre 100 kHz (DOUGLASS; TECHNOLOGIES, 1981) e 200 kHz (REDFERN et al., 2003), de modo que é possível trabalhar sem nenhum tipo de limitação com os elementos de proteção baseados em correntes de ondas viajantes.

Em contrapartida, a qualidade das medições fornecidas pelos transformadores de potencial capacitivo (TPCs) convencionais é significativamente inferior a dos TCs. Figura 3.10 apresenta

um circuito simplificado do TPC, considerando o reator de sintonização e o transformador redutor. Existe uma indutância em série que impede que o sinal de alta frequência possa ser medido na saída do TPC. No entanto, os transitórios causados pelas capacitâncias parasitas, que são dominantes e diferentes para cada projeto de TPCs (KEZUNOVIC; KOJOVIC, 1992), criam um caminho para os componentes de alta frequência, permitindo o surgimento de alguns transitórios no lado secundário do TPC. Embora essa medição de alta frequência, tensão de onda viajante (v_{TW}), não seja precisa em termos de magnitude, ela é precisa em termos de tempo de chegada e polaridade.

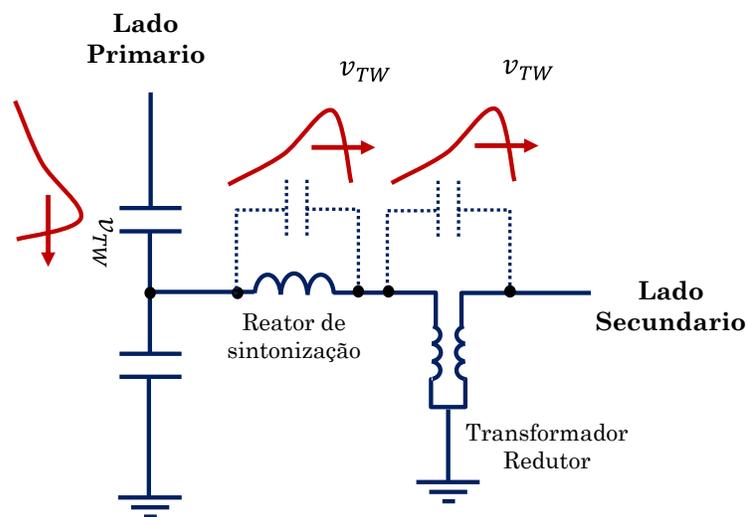


Figura 3.10: Circuito simplificado do TPC com capacitâncias parasitas através do reator de sintonização e do transformador redutor

3.3.1. FENÔMENO DE ONDA VIAJANTE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As faltas nos sistemas elétricos de potência resultam do rompimento não intencional do isolamento. No exato instante da falta se um observador remoto realiza medições no terminal da linha não irá identificar que a falta ocorreu, já que essas informações se propagam muito perto da velocidade da luz (linhas aéreas), percorrendo a linha chegando ao observador.

As ondas viajantes (TW) produzidas pelo defeito chegam aos terminais da linha e podem ser medidas com precisão de microssegundos através de estampa do tempo de chegada. Desta forma, estas informações podem ser utilizadas pelos métodos de localização de falta por onda viajante (TWFL: *Traveling Wave Fault Locator*) com dados de um ou dois terminais, revelando informações bastante precisas, como mostrado em (GUZMÁN et al., 2018; MARX et al., 2013;

SCHWEITZER et al., 2016). As TWs são geradas por qualquer tipo de falta, exceto pelas faltas monofásicas e bifásicas que ocorrem no cruzamento perto de zero da onda de tensão ou quando a resistência de falta é muito grande. Isso pode ser verificado com a Figura 3.11, onde apresentam-se as TWs que trafegam em uma linha de transmissão monofásica de uma rede puramente faltosa.

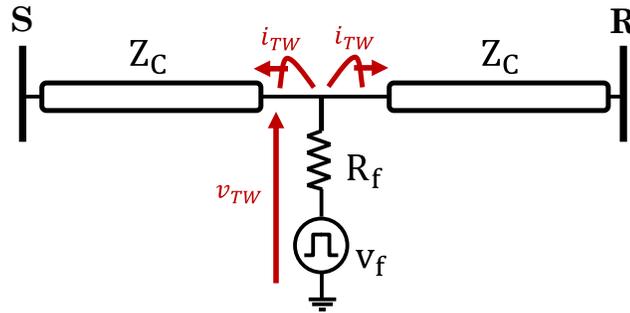


Figura 3.11: TWs que trafegam na linha de transmissão monofásica

A propagação das TWs a partir do ponto de defeito produz uma mudança brusca nas tensões e correntes nos terminais. No local da falta a tensão v_f depende da tensão pré-falta (v_{pre}) e do ângulo de incidência (ϑ) como segue:

$$v_f = v_{pre} \cdot \sin(\vartheta) \quad (3.41)$$

A amplitude da TW (v_{TW}) de tensão e da TW (i_{TW}) de corrente gerados no ponto de falta dependem só das impedâncias de surto vistas pela frente de onda no início da propagação. Desta forma os sistemas conectados nos terminais não influenciam as amplitudes das TWs produzidas pela falta, mas apenas nas amplitudes das TWs medidas nos terminais (SCHWEITZER et al., 2014).

Os sinais v_{TW} e i_{TW} podem ser calculados por um divisor de tensão entre R_f e o paralelo de Z_c em ambos lados dos terminais S e R, e pela lei de Ohm com v_{TW} e Z_c , respectivamente, como mostrado a seguir:

$$v_{TW} = \frac{Z_C \cdot v_{pre} \cdot \sin(\vartheta)}{Z_C + 2 \cdot R_f} \quad (3.42)$$

$$i_{TW} = \frac{v_{TW}}{Z_C} \quad (3.43)$$

Conforme (3.42), se o ângulo de incidência da falta ϑ for zero ou muito próximo de zero, ou se a resistência de falta for muito grande, o valor de v_{TW} pode ser muito baixo para sensibilizar a proteção.

3.3.2. EQUACIONAMENTO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA NUMA LINHA DE TRANSMISSÃO

Pode-se considerar uma pequena seção de comprimento, Δx , de uma linha de transmissão monofásica, como se apresenta na Figura 3.12. O circuito inclui resistência R , indutância L , capacitância C e condutância G por unidade de comprimento. A análise a seguir pode ser estendida para os componentes de sequência de uma linha de transmissão trifásica balanceada.

Usa-se a lei de Kirchhoff de tensão e de corrente a seguir, respectivamente, para o relacionamento das tensões e correntes nas localizações x e $x + \Delta x$.

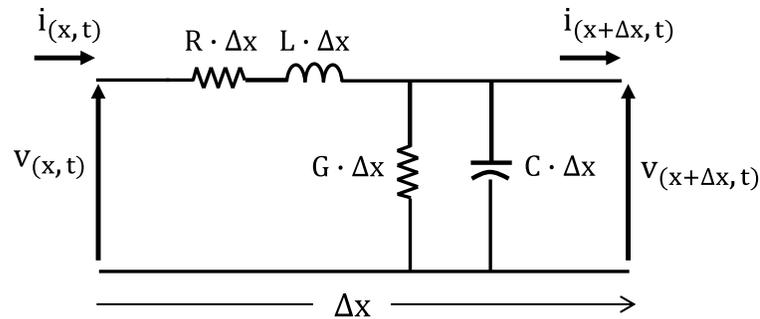


Figura 3.12: Circuito equivalente de um segmento de linha de transmissão monofásica

$$v_{(x,t)} = R \cdot \Delta x \cdot i_{(x,t)} + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i_{(x,t)}}{\partial t} + v_{(x+\Delta x,t)} \quad (3.44)$$

$$i_{(x,t)} = G \cdot \Delta x \cdot v_{(x+\Delta x,t)} + C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v_{(x+\Delta x,t)}}{\partial t} + i_{(x+\Delta x,t)} \quad (3.45)$$

Quando se aproxima Δx a zero, e substituindo pelas derivadas de tensão e corrente obtêm-se:

$$\frac{\partial v_{(x,t)}}{\partial x} = -R \cdot i_{(x,t)} - L \cdot \frac{\partial i_{(x,t)}}{\partial t} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial i_{(x,t)}}{\partial x} = -G \cdot v_{(x,t)} - C \cdot \frac{\partial v_{(x,t)}}{\partial t} \quad (3.47)$$

Logo, transformando as equações (3.46) e (3.47) do domínio do tempo no domínio da frequência como segue:

$$\frac{\partial V_{(x,s)}}{\partial x} = -(R + sL) \cdot I_{(x,s)} = -\bar{Z} \cdot I_{(x,s)} \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial I_{(x,s)}}{\partial x} = -(G + sC) \cdot V_{(x,s)} = -\bar{Y} \cdot V_{(x,s)} \quad (3.49)$$

Onde \bar{Z} é a impedância e \bar{Y} a admitância da linha de transmissão. Para conseguir duas equações separadas que envolvam apenas a tensão e somente a corrente, deriva-se novamente (3.48) e (3.49) com respeito à x para obter:

$$\frac{\partial^2 V_{(x,s)}}{\partial x^2} = \bar{Z} \cdot \bar{Y} \cdot V_{(x,s)} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,s)}}{\partial x^2} = \bar{Z} \cdot \bar{Y} \cdot I_{(x,s)} \quad (3.51)$$

Define-se a constante de propagação como se segue

$$\bar{\gamma} = \sqrt{(R + sL)(G + sC)} = \alpha + j\beta \quad (3.52)$$

Que consiste em uma parte real (α), chamada de constante de atenuação da linha, e outra imaginária (β), chamada de constante de fase da linha.

E as equações de onda que incluem $\bar{\gamma}$ em:

$$\frac{\partial^2 V_{(x,s)}}{\partial x^2} = \bar{\gamma}^2 \cdot V_{(x,s)} \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,s)}}{\partial x^2} = \bar{\gamma}^2 \cdot I_{(x,s)} \quad (3.54)$$

Cuja solução geral é representada por:

$$V_{(x,s)} = V_I \cdot e^{-\bar{\gamma}x} + V_R \cdot e^{\bar{\gamma}x} \quad (3.55)$$

$$I_{(x,s)} = I_I \cdot e^{-\bar{\gamma}x} + I_R \cdot e^{\bar{\gamma}x} \quad (3.56)$$

As equações (3.53) e (3.54) descrevem a propagação de ondas viajantes em uma linha de transmissão após uma perturbação, como uma mudança de degrau na tensão causada por faltas ou manobras de chaveamentos. Também os sinais de tensão e a corrente em qualquer ponto da linha são descritos pela soma de dois componentes referidos como a onda progressiva $V_I \cdot e^{-\bar{\gamma}x}$, $I_I \cdot$

$e^{-\gamma x}$ e a onda regressiva $V_R \cdot e^{\gamma x}$, $I_R \cdot e^{\gamma x}$. Além disso, examina-se que a relação entre a tensão e a corrente para os componentes incidentes e refletidos dependem dos parâmetros da linha, podendo ser definida a impedância característica da linha como segue:

$$Z_C = \frac{V_I}{I_I} = -\frac{V_R}{I_R} = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad (3.57)$$

Depois de examinar o fenômeno de propagação de ondas viajantes dentro da linha de transmissão, o seguinte passo é observar o que acontece quando as TWs atingem pontos de descontinuidade ou transição, por exemplo, pontos onde a impedância de terminação muda. Conforme representado na Figura 3.13, quando as TWs incidentes de tensão v_I e de corrente i_I chegam a um terminal de linha, uma parte das ondas é refletida, v_R e i_R , e outra é transmitida, v_T e i_T . A magnitude da onda que é transmitida ou refletida depende da impedância de terminação (Z_T) e a impedância característica (Z_C) da linha.

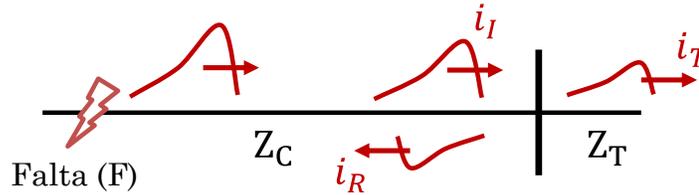


Figura 3.13: TWs de corrente incidente (i_I), transmitida (i_T), e refletida (i_R).

No instante em que a TW atinge a impedância de terminação (Z_T), a relação entre a tensão v_{TW} e a corrente i_{TW} no terminal é dada pela equação (3.58):

$$\frac{v_{TW}}{i_{TW}} = \frac{v_I + v_R}{i_I + i_R} = Z_T \quad (3.58)$$

$$\frac{v_I}{i_I} = -\frac{v_R}{i_R} = Z_C \quad (3.59)$$

A chegada de v_I no terminal cria uma TW refletida, v_R , e transmitida, v_T , de acordo com:

$$v_R = \frac{Z_T - Z_C}{Z_T + Z_C} v_I = \Gamma_v v_I \quad (3.60)$$

$$v_T = \frac{2 \cdot Z_T}{Z_T + Z_C} v_I = T_v v_I \quad (3.61)$$

Onde Γ_v e T_v são os coeficientes de reflexão e transmissão da tensão, respectivamente.

Da mesma forma pode-se obter o coeficiente de reflexão da corrente, Γ_i , e o coeficiente de transmissão da corrente, T_i , como segue:

$$\Gamma_i = \frac{Z_C - Z_T}{Z_T + Z_C} \quad (3.62)$$

$$T_i = \frac{2 \cdot Z_T}{Z_T + Z_C} \quad (3.63)$$

De acordo com (3.60), (3.61), (3.62) e (3.63) a energia da onda incidente de tensão e corrente se divide entre as ondas transmitidas e refletidas. Por exemplo, se $Z_C = Z_T$, nenhuma energia é refletida e toda a energia é transmitida. Se $Z_T = 0$, a onda de tensão refletida é igual à onda incidente de tensão, mas com sinal oposto e nenhuma energia é transmitida (caso de curto-circuito). Se $Z_T = \infty$, a onda de corrente refletida é igual à onda de corrente incidente, mas com sinal oposto e nenhuma energia é transmitida (caso de circuito aberto).

3.3.3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DIRECIONAL TW32

O elemento de proteção direcional baseado em onda viajante (TW32) compara a polaridade relativa das TWs de corrente e tensão, as quais são adquiridas através dos equipamentos de medição (TCs e TPCs) na ordem de MHz. Os requisitos de largura de banda para esses elementos são maiores do que os elementos direcionais baseados em fasores. Larguras de banda larga permitem respostas superiores das velocidades de operação desses elementos (SCHWEITZER et al., 2015). Em (JOHNS, 1980) foi proposto o uso de elementos direcionais baseados em TWs que exigem medições de tensão de alta qualidade, que não estão disponíveis em subestações regulares. No entanto, na maioria dos casos os TPCs podem medir a primeira onda viajante de tensão (devido à interligação do transformador e do reator de sintonização através das suas capacitâncias parasitas), como foi mostrado na Figura 3.10. Essas capacitâncias parasitas criam um caminho para os sinais de alta frequência, permitindo que algumas ondas viajantes de tensão apareçam no terminal secundário do TPC. Desta forma é possível formular um novo elemento

direcional baseado em ondas viajantes que aproveita as informações somente das primeiras ondas viajantes de tensão e corrente em termos de polaridade e tempo de chegada do sinal.

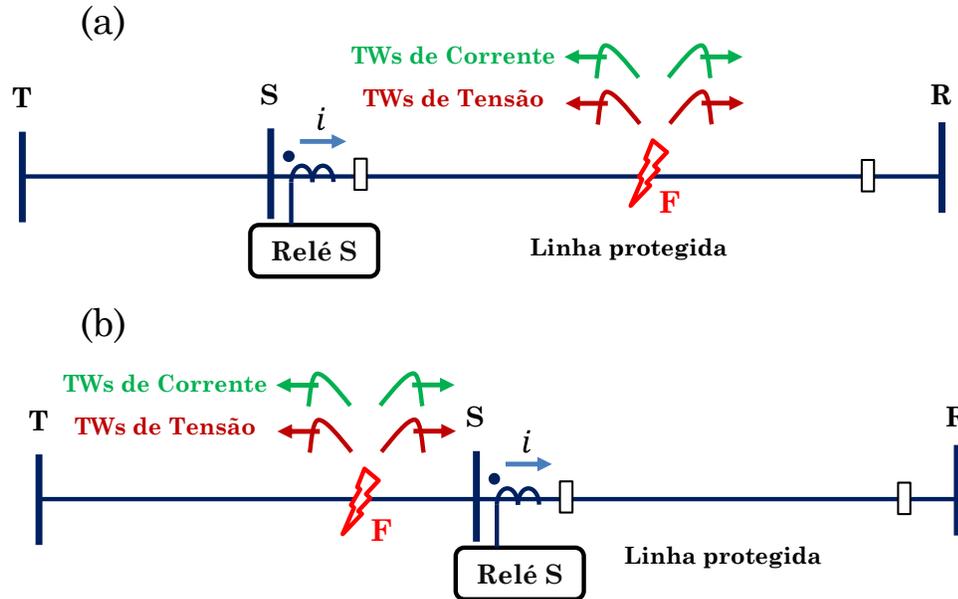


Figura 3.14: (a) Ondas viajantes para uma falta à frente, (b) ondas viajantes para uma falta reversa

Na Figura 3.15 ilustra-se o princípio de operação do elemento TW32 do sistema da Figura 3.14, com medições no relé S para uma falta à frente e reversa. Uma falta na linha (falta à frente) produz ondas de tensão e corrente que se movem em direção ao relé a partir do local do defeito. Como os TCs de proteção medem a corrente em direção à linha, as ondas que chegam da direção à frente, a onda de tensão, v_{TW1} , e a de corrente, i_{TW1} , medidas pelo relé são de polaridades opostas, ver Figura 3.15(a). Uma falta reversa lança TWs de corrente e tensão que chegam por trás do relé de barramento S e continuam em direção à linha, de modo que, a TW de tensão, v_{TW2} , e corrente, i_{TW2} , medidas pelo relé têm a mesma polaridade.

Conclui-se que a polaridade da primeira TW de tensão e corrente indica a direção da falta, as TWs que seguem depois da primeira TW podem chegar desde direções reversa ou à frente independentemente da direção da falta.

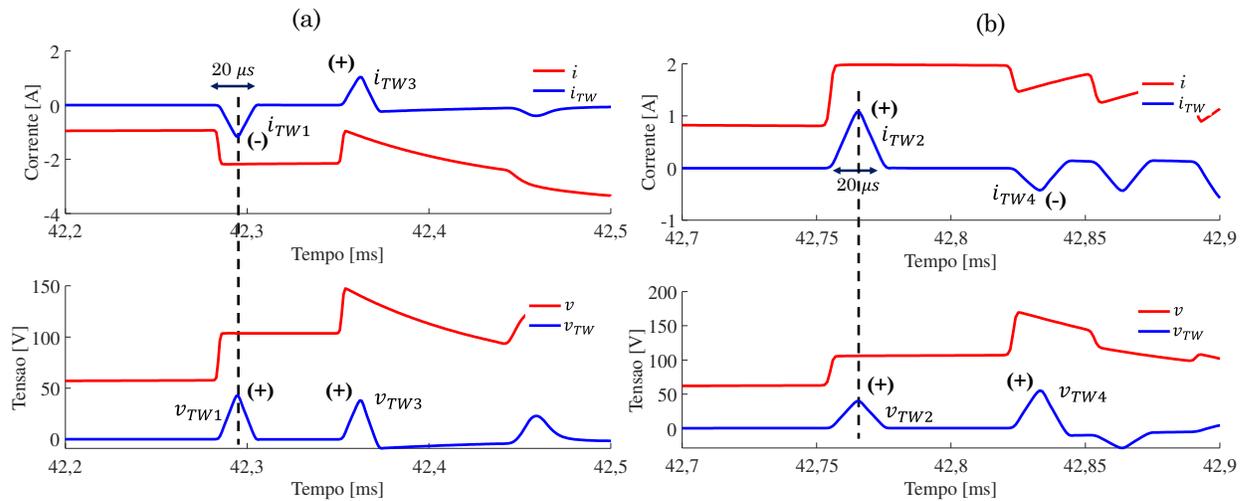


Figura 3.15: Princípio de Operação do elemento TW32: (a) falta à frente, e (b) falta reversa

Por exemplo, v_{TW3} e i_{TW3} na Figura 3.15(a) vêm de uma direção reversa, portanto, é reflexão de uma descontinuidade atrás do relé localizado no terminal. Na Figura 3.15(b) v_{TW4} e i_{TW4} , chegam da direção à frente, por conseguinte, é uma reflexão das descontinuidades à jusante do relé, como um barramento remoto ou uma derivação de linha.

3.3.4. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ELEMENTO DIFERENCIAL TW87

O elemento diferencial de linha baseado em ondas viajantes (TW87) também compara polaridades, porém, somente das correntes de TWs em ambos os terminais alinhadas no tempo. Então, fazendo uso do mesmo sistema da Figura 3.14, mas considerando um relé também no terminal R, para uma falta externa, entre os terminais T e S, por exemplo, a TW de corrente trafega para o terminal S, entra no TC desse terminal pela polaridade e se dirige ao terminal R, entrando agora no TC pela sua não-polaridade. O tempo em que a onda viajante leva para percorrer a linha protegida (entre os terminais S e R) é chamado de “tempo de propagação de onda viajante na linha” (TWLPT: ‘*Traveling wave line propagation time*’). Assim, cada relé medirá a mesma OV com uma polaridade distinta e defasada no tempo no valor do TWLPT, indicando que a falta é externa, conforme apresentado na Figura 3.16.

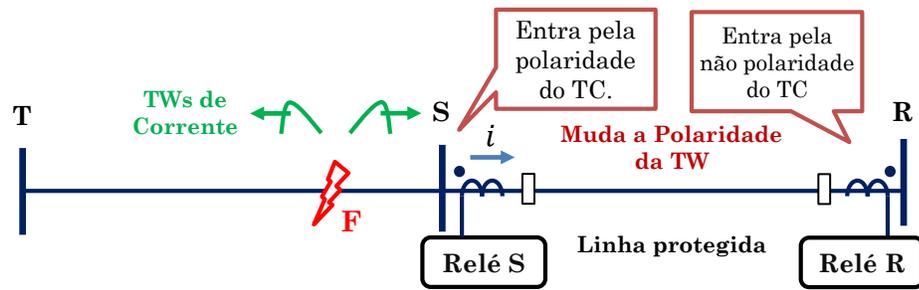


Figura 3.16: OVs de corrente para uma falha externa

Para uma falha interna, entre os terminais S e R, as TW de corrente trafegarão pela linha de transmissão protegida e entrarão em ambos TCs pela não-polaridade. Isso fará com que os relés dos dois terminais, S e R, meçam as ondas viajantes com a mesma polaridade e defasadas no tempo de um valor inferior ao TWLPT. Esta é uma característica de falhas internas à linha. A explicação pode ser exemplificada na Figura 3.17:

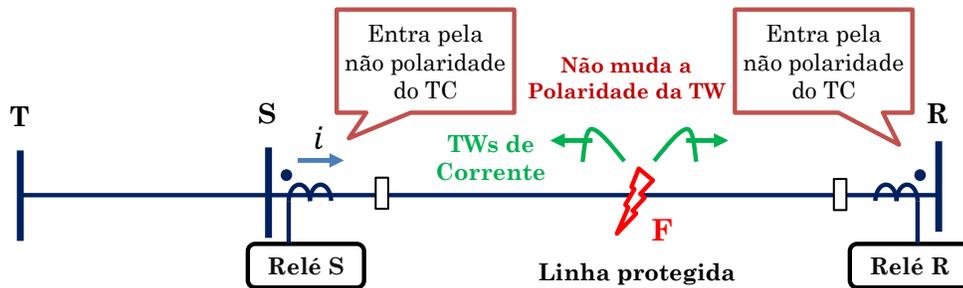


Figura 3.17: TWs de corrente para uma falha interna

Então, baseando-se nos princípios operacionais antes descritos, o relé internamente vai calcular e comparar duas grandezas chamadas: corrente de operação, i_{OP} , e corrente de restrição, i_{RT} . Essas correntes nas análises a seguir são desenvolvidas considerando que a TW chega primeiro ao terminal S, sendo possível estabelecer facilmente uma analogia para o caso em que a TW atinge primeiro o terminal R.

A corrente de operação é definida como a soma das primeiras TWs de corrente em cada terminal, como segue:

$$i_{OP} = |i_{TWS(t)} + i_{TWR(t-P)}| \quad (3.64)$$

Em que t é um tempo discreto, $i_{TWS(t)}$ e $i_{TWR(t-P)}$ são as primeiras TWs de corrente nos terminais S e R respectivamente, e P é o ajuste de tempo discreto necessário para que as amostras

de ondas viajantes em R se alinhem com as ondas viajantes em S. Esse ajuste é necessário uma vez que as TWs não chegarão no mesmo instante de tempo em ambos os terminais, a não ser para o caso da falha ocorrer exatamente no meio da linha de transmissão.

A corrente de restrição é um pouco mais complexa, sendo necessário para o seu entendimento a adição de mais um parâmetro, o tempo de propagação de ondas na linha de transmissão, definido por simplicidade como τ . Esse parâmetro corresponde ao tempo que a TW demora para trafegar de um terminal para o outro dentro da linha. Assim, define-se a corrente de restrição como o valor máximo da diferença entre a primeira TW de corrente em um terminal e a TW de corrente de saída no outro terminal defasadas de τ . Então se a primeira TW de corrente entrar pelo terminal local antes do terminal remoto, a equação é como segue:

$$i_{RS} = |i_{TWS(t)} - i_{TWR(t-\tau)}| \quad (3.65)$$

Em que t é um tempo discreto, $i_{TWS(t)}$ é a primeira TW de corrente que atinge o terminal S no instante t , $i_{TWR(t-\tau)}$ é a TW de corrente esperada no terminal R defasada de τ do instante t .

O relé identificará uma falta interna, enviando um sinal de disparo para o disjuntor, quando a seguinte condição for satisfeita:

$$i_{OP} > k \cdot i_{RS} \quad (3.66)$$

Sendo k um fator de restrição que define a sensibilidade da função.

Para faltas interna as TWs em ambos os terminais possuem a mesma polaridade, fazendo com que a soma, $i_{TWS(t)} + i_{TWR(t-P)}$, resulte em um valor elevado e a subtração, $i_{TWS(t)} - i_{TWR(t-\tau)}$, em um valor baixo, o que fará com que a condição (3.66) seja atendida, resultando assim em uma atuação do relé. A Figura 3.18 ilustra estas condições.

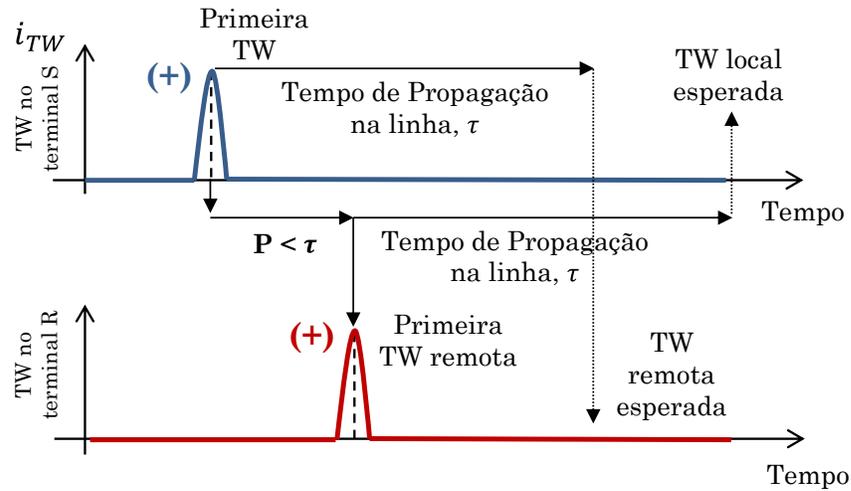


Figura 3.18: TWs de corrente no domínio do tempo para uma falta interna

Para faltas externas as ondas viajantes possuem polaridades diferentes nos terminais, fazendo com que a soma $i_{TWS(t)} + i_{TWR(t-P)}$ resulte em um valor baixo e a subtração $i_{TWS(t)} - i_{TWR(t-\tau)}$ em um valor alto, o que fará com que a condição (3.66) não seja atendida e o relé não atue. A Figura 3.19 ajuda a ilustrar o conceito.

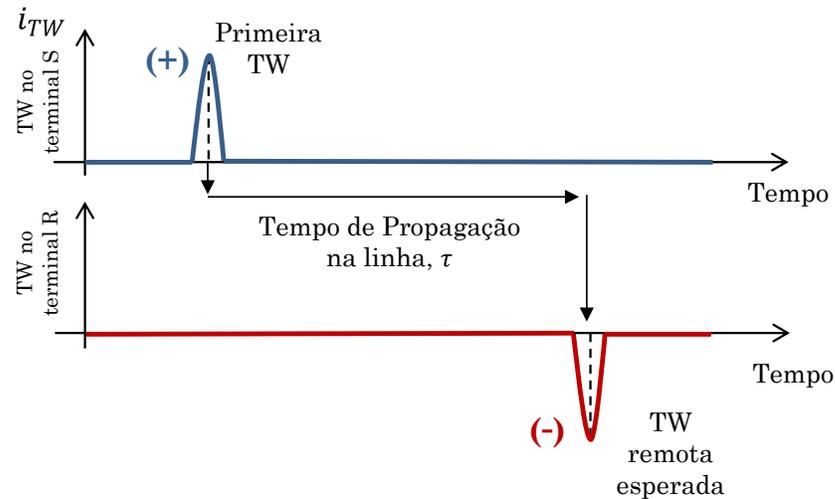


Figura 3.19: TWs de corrente no domínio do tempo para uma falta externa

CAPÍTULO IV

MODELAGEM E ALGORITMOS DO RELÉ NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste capítulo se detalha a implementação das lógicas de proteção do relé no domínio do tempo. Para facilitar o entendimento, primeiro se fará uma descrição da aquisição de dados e do processamento dos sinais implementados nos elementos de proteção baseado em grandezas incrementais (TD) e nos elementos de proteção baseados em ondas viajantes (TW). Em seguida, se descrevem os diagramas lógicos simplificados e como eles foram desenvolvidos, primeiro dos elementos TD32 e TD21 e na sequência dos elementos TW32 e TW87. Os modelos desenvolvidos são baseados no relé SEL-T400L, que é o novo relé no domínio do tempo que contém a proteção de alta velocidade (SEL, 2017). Toda a modelagem é feita no programa ATP através da sua linguagem interna MODELS, que facilita o desenvolvimento dos algoritmos e das lógicas de proteção.

4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS E PROCESSAMENTO DOS SINAIS

Na Figura 4.1 apresenta-se um diagrama simplificado de aquisição e do processamento dos sinais. As correntes e tensões são reduzidas pelos elementos TCs e TPs, respectivamente. Aplica-se um filtro analógico passa-baixa com uma frequência de corte de 400 kHz para evitar *aliasing* do sinal de entrada, que em seguida é inserido no circuito conversor analógico-digital (A/D). A primeira etapa do circuito A/D, chamado de *Sampler and Holder* (S/H), efetua a amostragem dos sinais de entrada com uma taxa de amostragem de 1 MHz, adequada para realizar localização de falta e proteção baseadas em TWs. A segunda etapa consiste na conversão de cada amostra analógica recebida pelo bloco S/H em uma palavra binária (*bits*), que pode ser compreendida por um microprocessador, nesta pesquisa com 18 bits.

Com os sinais digitais na saída do bloco A/D, usa-se um filtro digital diferencial-suavizador (*differentiator-smoother* - DS) (ANDO; SCHWEITZER; BAKER, 1985) para extrair as TWs de

corrente e de tensão. Este filtro gera a derivada do sinal suavizado, o que traz grandes benefícios para o tratamento, dentre os quais estão incluídos: redução dos níveis de ruído e a detecção de variações bruscas em eventos transitórios, podendo ser considerada uma ferramenta adequada para ser aplicada na proteção e na localização de faltas baseadas em TW.

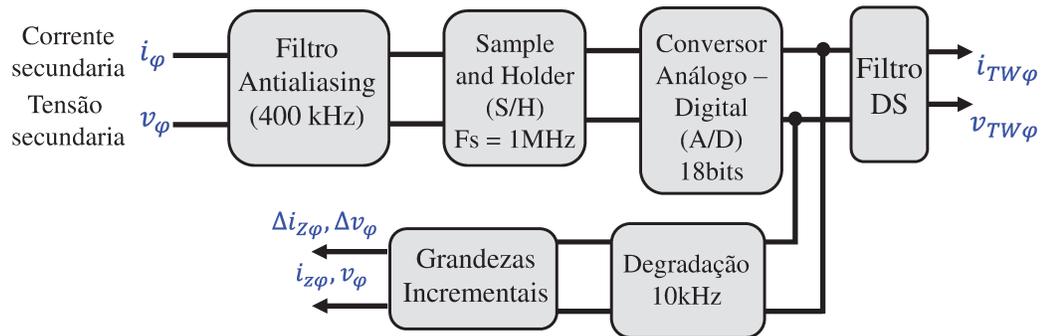


Figura 4.1: Diagrama simplificado de aquisição e processamento de dados

Além disso, utiliza-se também um filtro de degradação (*downsampling*) que reduz a taxa de amostragem da entrada de 1 MHz para 10 kHz, permitindo o uso de algoritmos de proteção baseado em grandezas incrementais (TD). Finalmente aplicam-se filtros passa-baixa para os elementos de proteção TD21 e TD32. Filtros passa-baixa na ordem de centenas de Hertz são necessários para conseguir uma precisão no alcance desejado do elemento TD21. Nesta pesquisa usou-se 180 Hz.

4.1.1. FILTRO ANALÓGICO

Aplica-se um filtro analógico passa-baixa para evitar a superposição do espectro de frequência (*aliasing*) do sinal de entrada antes do processo de amostragem, como é mostrado na Figura 4.1. O filtro adotado nesta pesquisa é do tipo *Butterworth* passa-baixa de terceira ordem com frequência de corte de 400 kHz.

A função de transferência do filtro utilizado e seus coeficientes foram obtidos através do programa MATLAB, sendo reproduzida a seguir:

$$H(s) = \frac{1,59 \cdot 10^{19}}{s^3 + 5,03 \cdot 10^6 s^2 + 1,26 \cdot 10^{13} s + 1,59 \cdot 10^{19}} \quad (4.1)$$

Sua implementação foi feita no ambiente MODELS através da função LAPLACE que permite que a função de transferência do filtro seja programada diretamente. Os sinais de entrada

são as correntes e tensões por fase secundárias dos equipamentos analógicos TCs e TPCs, respectivamente. Em seguida os sinais de saída são injetados no bloco *Sample and Hold*.

4.1.2. SAMPLE AND HOLD

A primeira etapa do processo de digitalização de um sinal analógico para que possa ser interpretado por sistemas digitais consiste na função *Sample and Hold* (S/H), que deve capturar e manter constante um sinal durante um intervalo de tempo. De acordo com o critério de *Nyquist* sobre amostragem de sinal, deve-se escolher uma frequência de amostragem de no mínimo duas vezes a frequência máxima de interesse. Nesta pesquisa foi utilizado 1 MHz, valor que é utilizado pelo relé e que corresponde a uma taxa de aproximadamente 16.667 amostras/ciclo. Esta taxa de amostragem é suficiente para poder detectar as ondas viajantes utilizadas pelas funções de proteção e localização de falta baseado em TW.

Além disto, foi escolhida uma frequência de amostragem de 10 kHz para as funções de proteção baseadas em grandezas incrementais (TD), que são obtidas através de um processo de *downsampling*, como é mostrado na Figura 4.1.

Para ambas implementações foi utilizado no ambiente MODELS o comando `TIMESTEP MIN`, fazendo com que os valores sejam atualizados em um passo diferente da simulação, ou seja, a cada período de amostragem. Na Figura 4.2 ilustra-se a saída do *Sample and Hold* para os algoritmos de grandezas incrementais, ou seja, $f_s = 10$ kHz.

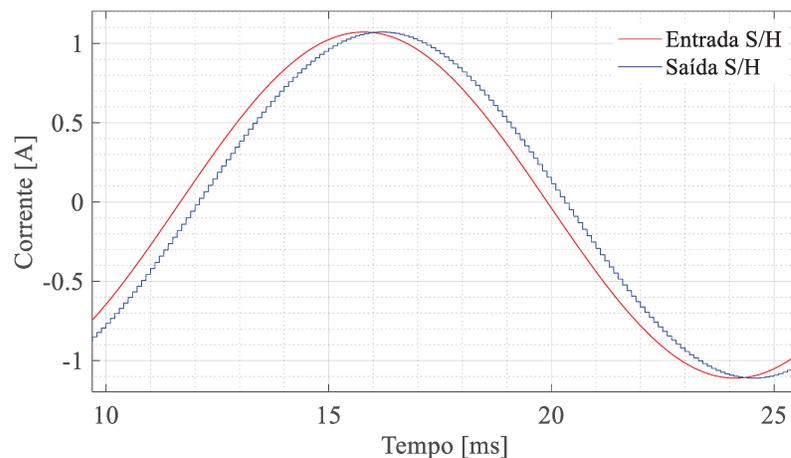


Figura 4.2: *Sampler and Holder* com frequência de amostragem de 10 kHz

4.1.3. CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

Para concluir a digitalização do sinal ele deve ser quantizado. Dentre as diversas técnicas de quantização optou-se pelo método de aproximações sucessivas por ser uma escolha comum na proteção digital. Este processo consiste na conversão de cada amostra analógica recebida pelo bloco S/H em uma palavra binária de $b+1$ bits que pode ser compreendida por um microprocessador. Nesta pesquisa adotou-se $b=18$ bits. O processo de quantização limita os valores que os sinais de entrada podem assumir, por exemplo, com palavras $b+1$ bits existem 2^{b+1} níveis de quantização possíveis para cada amostra.

Define-se a resolução do conversor A/D como sendo o valor na base 10 correspondente ao bit menos significativo (o mais à esquerda) da palavra de $b+1$ bits. A resolução depende da amplitude do sinal, Y , que é aceito pelo conversor sem que ocorra sua saturação, e se ele estiver operando em modo bipolar ($[-Y, Y]$), conforme mostrado em (4.2).

$$\text{Res} = \frac{Y}{2^b - 1} \quad (4.2)$$

Por exemplo, em um conversor bipolar de ± 10 V e 8 bit, a resolução é de 78 mV, representando 0,78% da amplitude do sinal. Com $b+1 = 18$ esse valor muda para 0,076 mV que equivale a 0,00076% da amplitude, muito mais preciso do que o primeiro caso. Esses últimos valores foram escolhido para este trabalho.

A seguir, para um determinado valor x , o valor digitalizado Z_{10} pode ser definido por:

$$Z_{10} = \text{ROUND} \left[\frac{x(2^b - 1)}{Y} \right], \text{ se } x \text{ é positivo} \quad (4.3)$$

$$Z_{10} = \text{ROUND} \left[\frac{(2 \cdot Y - |x|) \cdot 2^b}{Y} \right], \text{ se } x \text{ é negativo} \quad (4.4)$$

Onde Z_{10} é um valor inteiro na base 10, e ROUND representa a operação de arredondamento.

Uma vez calculado Z_{10} para uma amostra e o seu valor binário, pode-se obter o número em ponto flutuante PF para entradas positivas e negativas por (4.5) e (4.6), respectivamente. Este número já contém os erros de quantização do conversor:

$$PF = Z_{10} \cdot Res \quad (4.5)$$

$$PF = [Z_{10} - 2^{b+1}] \cdot Res \quad (4.6)$$

A saída do conversor A/D é um número binário correspondente a uma amostra de entrada. Entretanto, nesta simulação, sua saída é o valor em ponto flutuante que será usado no restante dos cálculos.

4.1.4. MODELAGEM DO FILTRO DS

O filtro *differentiator-smoother* (DS) foi utilizado com sucesso na década de 80 em (ANDO; SCHWEITZER; BAKER, 1985) e nos anos recentes em aplicações reais, sendo adequado para aplicações de proteção e localização de falta baseada em TW como o proposto em (SCHWEITZER et al., 2014). O filtro DS foi desenvolvido para reproduzir padrões em suas saídas com o objetivo de facilitar a análise das TWs induzidas por faltas. Para entender a operação do filtro DS apresenta-se a forma de onda de corrente para uma rede sob falta obtida do programa ATP, como mostrado na Figura 4.3. Pode-se observar que na operação de estado pré-falta a onda de corrente não é distorcida, existindo só a componente fundamental. Quando ocorre um evento de curto-circuito a tensão no ponto de falta afunda, fazendo que o sistema elétrico altere abruptamente sua condição de operação. Esses transitórios de alta frequência aparecem como TWs superpostas à nova forma de onda de estado estacionário, distorcendo e aumentando o valor da sua amplitude (condição de falta). A função do filtro DS é detectar essas mudanças bruscas na amplitude do sinal, refletindo na sua saída o seu valor com um ganho unitário.

A saída do filtro DS é o resultado do produto interno das amostras do sinal de entrada e dos coeficientes do filtro que se encontram dentro de uma janela de tamanho T_{DS} . Por exemplo, um degrau na entrada corresponde na saída a uma forma de onda triangular, como ilustrado na Figura 4.4. Pode-se notar que a saída do filtro DS é nula enquanto o sinal de entrada se mantém constante, e que apresentará seu valor máximo quando ocorrer a mudança de valor.

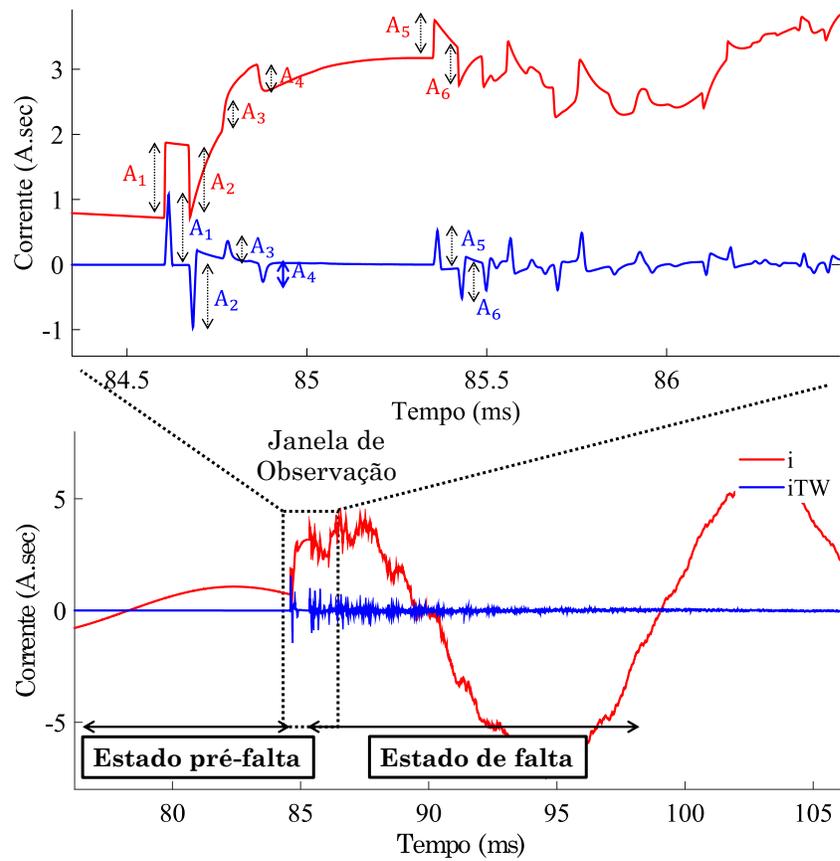


Figura 4.3: Corrente de falta $-i$ e sua saída através do filtro DS $-iTW$ (valores secundários)

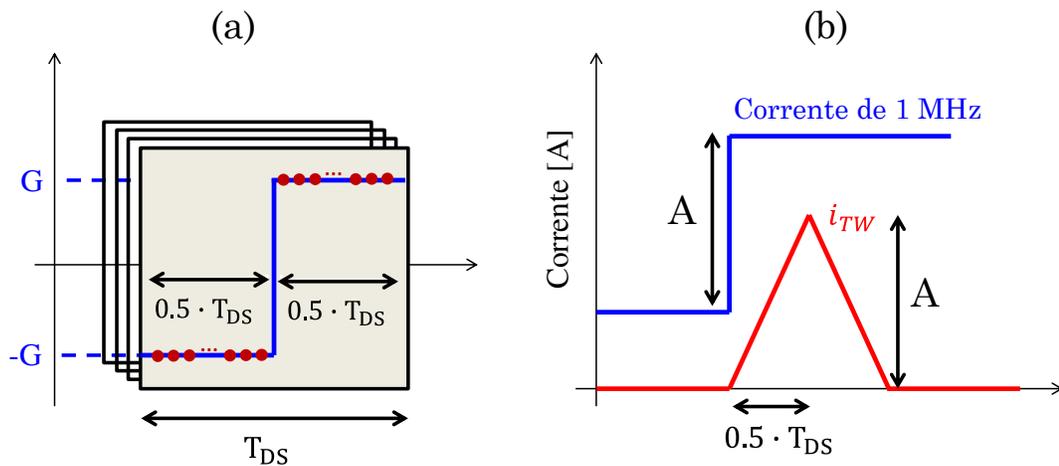


Figura 4.4: Filtro DS (a) Janela de coeficientes e (b) operação em resposta a uma entrada degrau (SCHWEITZER et al., 2017)

De acordo com o fabricante (SEL, 2017), o T_{DS} adota um valor de $20 \mu s$ em aplicações reais de filtro DS, considerando uma frequência de amostragem F_s de 1 MHz, valor que será tomado em conta nas simulações. No entanto, em (RIBEIRO, 2019) constata-se o uso de um

valor diferente (21 μs) para o T_{DS} com a mesma frequência de amostragem, porém sem alterações na amplitude máxima na sua saída.

O número de coeficientes (N_{DS}) é igual a:

$$N_{DS} = F_s \cdot T_{DS} = 20 \mu\text{s} \cdot 1 \text{ MHz} = 20 \quad (4.7)$$

O valor de G da Figura 4.4 foi definido igual a 0,1, garantindo uma saída com um ganho unitário de T_{DS} desejada.

4.2. IMPLEMENTAÇÃO DA PROTEÇÃO BASEADA EM GRANDEZAS INCREMENTAIS

Nesta seção são apresentadas as lógicas dos elementos de proteção baseados em grandezas incrementais (TD). Elas são executadas a cada 100 μs (0,1 ms) e monitoradas por uma lógica de partida que libera as funções lógicas de proteção dos *loops* das fases envolvidas na falta. Essa lógica de partida dos elementos de proteção TD mescla uma lógica não direcional com uma lógica de identificação do tipo de falta. Desta forma ela determina quais das seis medições dos *loops* de proteção estão envolvidas no defeito, liberando os elementos de proteção associados com esses *loops*. Por exemplo, para faltas monofásicas (AT) libera os *loops* associados com a fase em falha (AT, AB, CA). Portanto, a principal função da lógica de partida é liberar os elementos de proteção nos *loops* em falha e restringir os elementos de proteção das fases sãs. A função secundária da lógica de partida é habilitar a lógica de proteção somente durante os eventos de defeito e evitar medições de pequenas grandezas incrementais durante condições de regime permanente.

Para realizar isso, a lógica de partida do relé localizado no terminal S, por exemplo, como mostrado na Figura 4.5, calcula a tensão de partida (Δv_{START}) através da tensão incremental (Δv), e a corrente de réplica incremental (Δi_z). A tensão de partida é identificada como uma mudança na tensão na distância elétrica (Z_x) longe do relé, de acordo com (4.8). A lógica de partida utiliza o valor da impedância de sequência positiva ($Z1MAG$) da linha adicionado de uma margem de segurança, produzindo o valor de Z_x .

Durante uma condição de defeito as fases envolvidas deverão apresentar as maiores mudanças nas grandezas incrementais (Δv e Δi_z) dos seus *loops* de proteção respectivos, como apresentado na Tabela 3.1. Em consequência, a lógica de partida determina as tensões e correntes

de réplica incremental para as seis medições dos *loops* de falta (AT, BT, CT, AB, BC e CA), calculando e comparando as seis tensões de partida (Δv_{START}) de cada *loop* entre si para identificar os *loops* envolvidos na falha. Isto serve como uma identificação rudimentar do tipo de defeito.

$$\Delta v_{START} = |\Delta v| + Z_x |\Delta i_z| \quad (4.8)$$

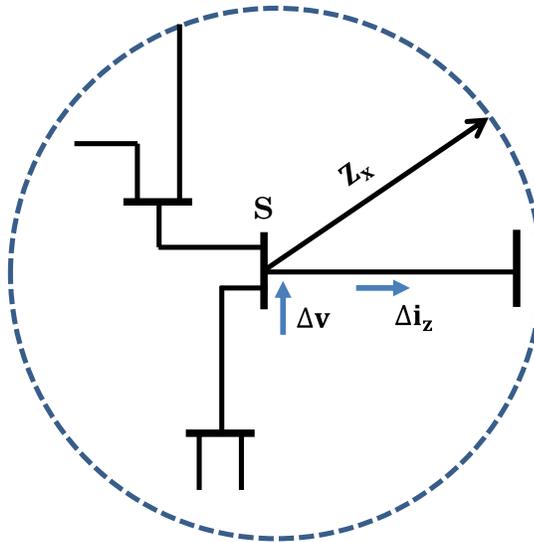


Figura 4.5: Princípio de operação da lógica de partida (SEL, 2017)

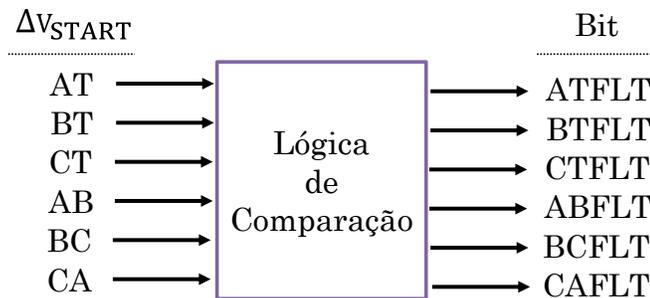


Figura 4.6: Lógica de identificação dos loops envolvidos na falta

Após a obtenção dos bits de saída, a lógica de partida marca o começo do distúrbio declarando o bit START igual a 1 quando pelo menos um dos seis bits na saída declara a ocorrência de um distúrbio (lógica OR). O bit START permanece ativo para um ciclo do sistema de potência, em seguida ele indica que as grandezas incrementais não são mais válidas (START = 0).

4.2.1. LÓGICA DO ELEMENTO DIRECIONAL POR GRANDEZAS INCREMENTAIS (TD32)

O diagrama lógico simplificado do elemento TD32 é apresentado na Figura 4.7 para o *loop* AT. A lógica integra o torque de operação S_{OP} e os torques de restrição S_{FWD} e S_{REV} . Os integradores (torques acumulados) deste elemento são controlados pela lógica de partida. Os torques de restrição são integrados no instante em que é detectado um distúrbio nas grandezas incrementais provocado pela ativação do bit START igual a um. Para melhorar a segurança, o torque de operação para qualquer *loop* de medição de proteção é integrado somente se o *loop* estiver pronto para operar antes da perturbação, e se a fase correspondente estiver envolvida na falha.

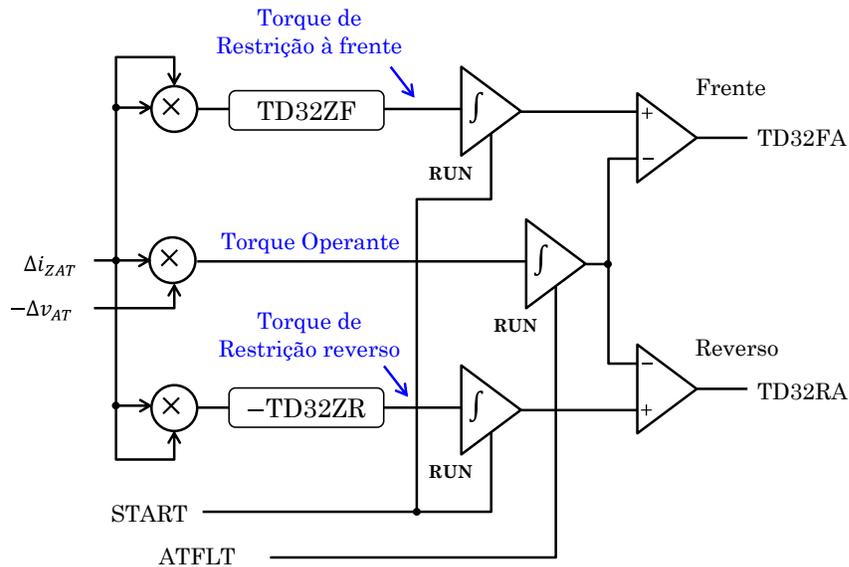


Figura 4.7: Lógica simplificada do elemento TD32, *loop* AT

O elemento TD32 declara um evento à frente se a integral do torque de operação é positiva e maior do que a integral do torque de restrição à frente. O elemento TD32 declara um evento reverso se a integral do torque de operação é negativa e maior, em termos de valor absoluto, do que a integral do torque reverso de restrição.

Quando o elemento TD32 declara um evento à frente ativa-se o elemento TD32F Φ ($\Phi = A, B, C$) se a fase correspondente estiver envolvida em uma falta à frente em um dos dois cenários possíveis: uma falha monofásica ocorreu na direção à frente do relé ou uma falha que envolve mais de duas fases na direção à frente do relé. Em contrapartida, o elemento TD32 declara um evento reverso do mesmo modo, através do elemento TD32R Φ ($\Phi = A, B, C$).

Por exemplo, para uma falta CAT na linha protegida, os bits TD32FC e TD32FA são ativados enquanto TD32FB, TD32RA, TD32RB, e TD32RC permanecem desligados. Para uma falta monofásica reversa CG, o bit TD32RC é ativado enquanto os bits TD32FA, TD32FB, TD32FC, TD32RA, e TD32RB permanecem desligados. Por conveniência, a lógica do elemento TD32 consolida (agrupa) os três bits por fase TD32F Φ em um único bit, TD32F, através de uma lógica OR. Do mesmo modo, TD32R é uma combinação OR dos três bits TD32R Φ .

De acordo com o princípio de operação do elemento TD32 descrito na seção anterior e as diretrizes recomendadas pela referência (KASZTENNY et al., 2016), os ajustes típicos do elemento TD32 são apresentados na Tabela 4.1. O ajuste TD32ZF deve ser menor do que a magnitude da impedância de sequência positiva da fonte local (a impedância de sistema forte, $\text{MIN}|Z1S|$) e recomendando-se um fator de segurança de 0,3.

Tabela 4.1: Ajuste do elemento TD32

	Nome	Descrição	Ajuste
TD32	TD32ZF	Limiar de impedância à frente [Ohm.sec]	$0,3 \cdot \text{MIN}(Z1S)$
	TD32ZR	Limiar de impedância reverso [Ohm.sec]	$0,3 \cdot Z1\text{MAG} $

O ajuste TD32ZR é definido para uma fração da soma de impedância de sequência positiva da linha e da impedância de sequência positiva do sistema remoto, assumindo a configuração mais forte do sistema remoto. Uma opção conservadora é negligenciar a impedância do sistema remoto e usar um fator de segurança de 0,3.

4.2.2. LÓGICA DO ELEMENTO DE DISTÂNCIA POR GRANDEZAS INCREMENTAIS (TD21)

Na Figura 4.8 ilustra-se a lógica simplificada do elemento TD21 para o *loop* AT. A lógica opera de forma independente para cada uma das seis medições do *loop* de proteção, como mostrado na Tabela 3.1. Após o cálculo do sinal de operação V21OP e do sinal de restrição V21RST, esses sinais são comparados de modo que se o sinal de operação é superior ao sinal de restrição é feita a integração da diferença entre os dois sinais. Inicia-se o integrador se o *loop* estiver envolvido na falta e se a tensão incremental no ponto de alcance resultar em uma queda de tensão (colapso). Em geral, a tensão incremental no ponto de alcance é produzida por qualquer alteração de tensão, seja uma diminuição ou aumento de tensão. O elemento TD21 é liberado somente se a tensão decrescer, e a redução é confirmada confrontando a polaridade relativa da

tensão de restrição, V21RST, antes do defeito com a tensão de operação, V21OP. A tensão incremental na falta deve ser negativa para uma tensão de restrição positiva e vice-versa. Esta verificação fornece segurança extra durante a manobra de equipamentos, por exemplo. Ao fazer essa verificação, o elemento TD21 responde efetivamente à tensão de restrição definida, e não somente ao valor absoluto dela.

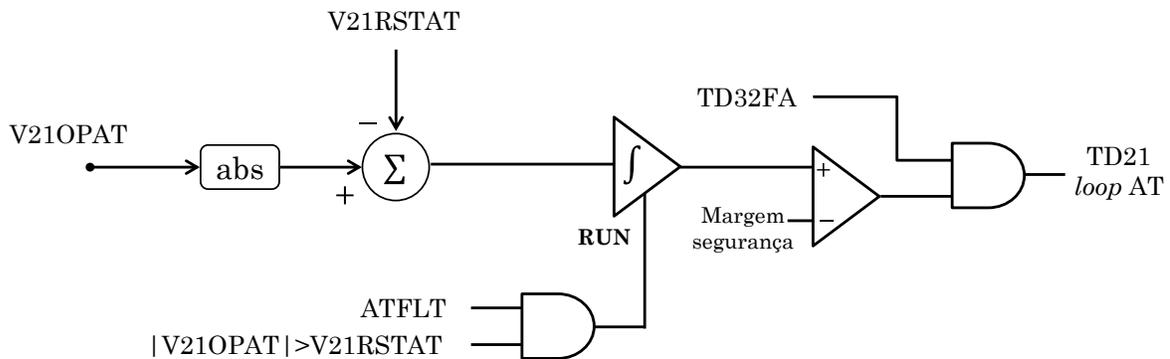


Figura 4.8: Diagrama lógico simplificado do elemento TD21, loop AT

O integrador é executado a partir do momento em que o valor absoluto do sinal de operação torna-se maior do que o sinal de restrição, além destes sinais terem polaridades opostas. O elemento TD21 do loop AT é ativado se a diferença integrada estiver acima de uma margem de segurança e se o elemento de supervisão TD32 do loop envolvido no defeito indicar uma direção à frente.

O elemento TD21 usa lógicas idênticas para os loops de fase e terra. A lógica TD21 consolida os três bits de loop de terra (TD21AT, TD21BT e TD21CT) em um único bit (TD21G) através de uma operação OR. Também consolidam os três bits de loop de fases (TD21AB, TD21BC e TD21CA) em um único bit TD21P.

Na programação do elemento TD21 o relé usa as seis medições dos loops de falta para cobrir todos os tipos de falta e poder aplicar uma tensão pré-falta instantânea no ponto de alcance como um sinal de restrição para sensibilidade e velocidade. O usual é que o elemento forneça configurações de alcance independentes para os elementos de fase e terra, TD21MP e TD21MG, respectivamente. Os ajustes de fase e terra do elemento TD21 devem cobrir a maior parte da linha protegida, deixando uma margem de segurança curta do barramento remoto. A margem de segurança é obtida pela soma dos erros percentuais dos TPs e TPCs, dos dados de impedância da linha, precisão do relé em regime permanente e sobrealcance transitório, resultando nos ajustes

apresentados na Tabela 4.2. Como os dados de impedância de sequência zero são geralmente menos precisos do que os dados de impedância da linha de sequência positiva, aplica-se uma margem de segurança maior ao definir o alcance do elemento TD21 de terra (KASZTENNY et al., 2016).

Tabela 4.2: Ajuste do elemento TD21

	Nome	Descrição	Ajuste
TD21	TD21MP	Alcance para o elemento de distância de fases [%]	0,75
	TD21MG	Alcance para o elemento de distância de terra [%]	0,7

4.3. IMPLEMENTAÇÃO DA PROTEÇÃO BASEADA EM ONDAS VIAJANTES

Estes elementos utilizam o conteúdo de alta frequência (centenas de kHz) das correntes de entrada no relé e, em menor grau, das tensões. Do ponto de vista do processamento do sinal, as TWs podem ser entendidas como mudanças abruptas nos sinais de entrada com um tempo de subida na ordem de alguns microssegundos. O relé no domínio do tempo implementado trabalha com uma amostragem de tensão e corrente a uma taxa de 1 MHz.

As proteções baseadas em onda viajante (elementos TW) tais como: a proteção direcional de onda viajante (TW32) e a proteção diferencial de onda viajante (TW87) são comandados pela lógica de detecção TW, a qual libera as proteções quando um distúrbio for detectado na linha protegida. Isto é feito através da comparação da soma dos valores absolutos de TW por fase, tanto de tensão (v_{TWA} , v_{TWB} e v_{TWC}) como de corrente (i_{TWA} , i_{TWB} e i_{TWC}), comparado com um valor mínimo de sensibilidade (TSH_i e TSH_v), como segue:

$$|i_{TWA}| + |i_{TWB}| + |i_{TWC}| > TSH_i \quad (4.9)$$

$$|v_{TWA}| + |v_{TWB}| + |v_{TWC}| > TSH_v \quad (4.10)$$

O valor de sensibilidade de corrente (TSH_i) é um valor escolhido empiricamente como uma porcentagem do valor nominal da corrente do lado secundário do TC. Do mesmo modo são utilizadas as TW de tensão na lógica de detecção.

Colocando as inequações anteriores em um diagrama lógico, tem-se o esquema na Figura 4.9:

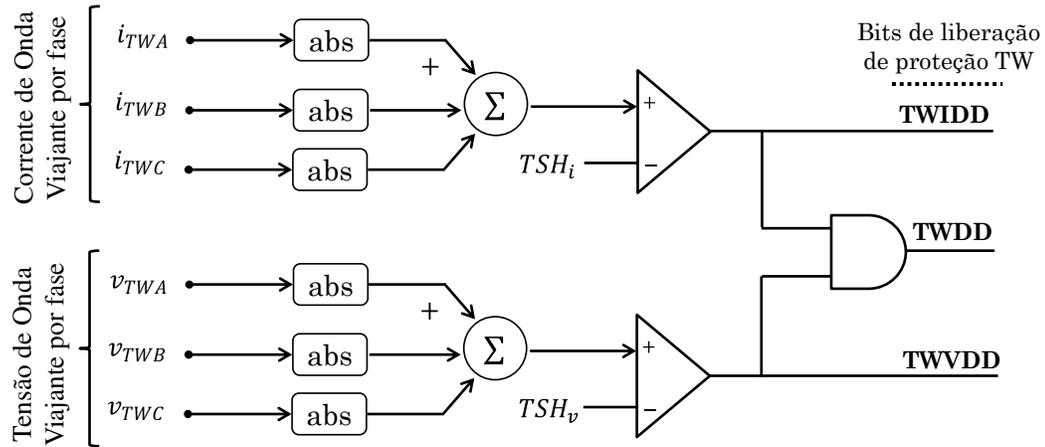


Figura 4.9: Diagrama da lógica de detecção TW

Cabe ressaltar que o elemento TW87 só utiliza TWs de corrente por fase. Portanto, suas lógicas de proteção são ativadas pelo bit TWIDD. No entanto, o elemento TW32, precisa de TWs de tensão e de corrente para operar. Portanto, suas lógicas são ativadas pelo bit TWDD (lógica AND dos bits TWIDD e TWVDD).

4.3.1. LÓGICA DO ELEMENTO DIRECIONAL POR ONDA VIAJANTE (TW32)

O elemento TW32 utiliza TWs de tensão e corrente por fase, calculando o produto da TW de corrente e o sinal contrário da TW de tensão (para faltas à frente o produto é positivo) para cada fase, como mostrado na Figura 4.10. Logo, o elemento integra esse produto ao longo do tempo para obter a energia associada com a primeira TW. Por segurança, a lógica do elemento TW32 ativa os integradores por fase somente se o bit de liberação da proteção TW (TWDD) dado pela lógica de detecção TW é liberado, indicando uma condição de defeito no sistema. Os integradores integram apenas algumas dezenas de microssegundos (T_{IN}), nesta pesquisa 100 μ s, porque o elemento TW32 é projetado para responder apenas às primeiras TWs. Após o tempo de integração, T_{IN} , expirar a lógica bloqueia os integradores por um período de algumas dezenas de milissegundos (T_{OUT}) para impedir a operação para as reflexões de TWs subsequentes.

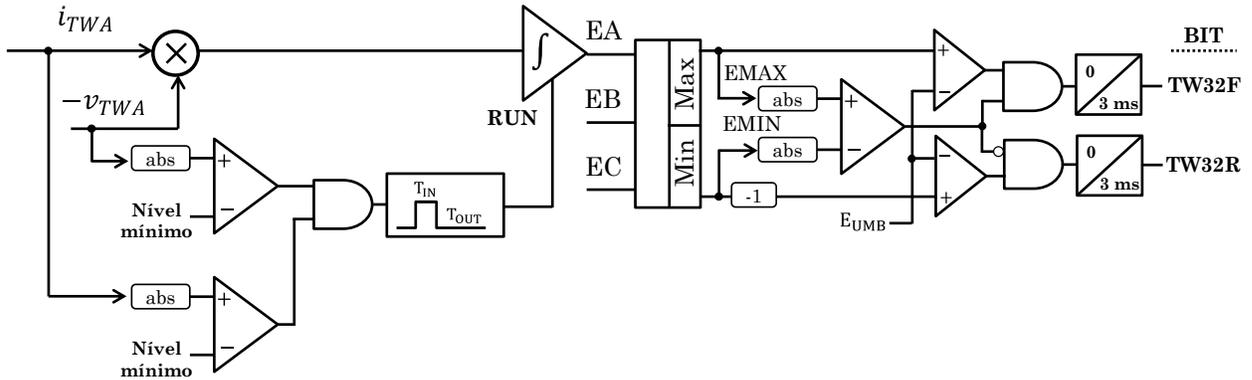


Figura 4.10: Diagrama lógico simplificado do elemento TW32 (para fase A) (GUZMÁN et al., 2018)

Quando a integração estiver completa os sinais das energias de operação por fase (EA, EB e EC) indicam uma direção de falha à frente (se for positiva) ou uma direção de falha reversa (se for negativa). Para a lógica continuar a energia integrada deve exceder um limite pré-definido (EUMB). Além disso, a lógica calcula os valores máximo e mínimo entre os três sinais de energia por fase, fazendo uso da energia positiva mais alta (máxima), EMAX, e a energia negativa mais alta (mínima), EMIN, para segurança adicional. Se o valor máximo for positivo e maior, em termos de valor absoluto, do que o valor mínimo, o elemento direto TW32F será ativado. Se o valor mínimo for negativo e maior em termos de valor absoluto do que o valor máximo, o elemento reverso TW32R será ativado.

Em termos de inequações devem-se reunir as condições de (4.11) e (4.12) para que o elemento TW32 declare falta à frente ou falta reversa, respectivamente:

$$|EMAX| > |EMIN|, EMAX > EUMB \quad (4.11)$$

$$|EMIN| > EMAX, EMIN < -EUMB \quad (4.12)$$

Além disso, o elemento TW32 incorpora uma lógica de identificação de falta baseado em TW. Essa lógica analisa os níveis relativos das energias EA, EB e EC, e deriva os bits por fase (TW32FA, TW32FB, e TW32FC) após a ativação do TW32F. O processo considera o valor da energia máxima (EMAX), conferindo informação suficiente sobre a fase envolvida no defeito para falhas monofásicas. A lógica também identifica uma das fases envolvidas em defeitos que envolvem mais de uma fase. Uma vez liberado o sinal TW32F (a combinação OR de TW32FA, TW32FB e TW32FC), o bit permanecerá ativado por 3 ms (KASZTENNY et al., 2016). Esse

tempo é necessário para contemplar o caso em que o elemento direcional é parte de um esquema POTT em conjunto com o elemento TD32, como será visto nas próximas seções.

O elemento TW32 não tem capacidade de declarar falhas quando elas ocorrem perto de valores muito baixos da tensão, para defeitos de alta impedância, ou quando o TPC atenuar de forma acentuada os sinais de alta frequência, pois nestes casos a variação na tensão é pequena.

4.3.2. LÓGICA DO ESQUEMA DIFERENCIAL POR ONDA VIAJANTE (TW87)

O esquema de proteção diferencial baseado em onda viajante (TW87) usa TWs de corrente por fase (i_{TWA} , i_{TWB} e i_{TWC}), as tensões instantâneas dos terminais local e remoto (v_A , v_B e v_C), e um canal de comunicação ponto a ponto para detectar faltas na zona protegida. Nesta pesquisa considerou-se um canal de comunicação sem latência e com os dados alinhados no tempo por simplicidade. Os algoritmos e lógicas internas do esquema diferencial TW87 são ativados quando o bit de liberação de proteção TW de corrente (TWIDD) dado pela lógica de detecção é positivo, indicando que o sistema elétrico está passando por um transitório.

De acordo com o princípio de operação descrito na seção anterior e com as lógicas descritas em (SEL, 2017), como primeiro passo é identificado o instante em que a primeira TW de corrente atinge os terminais local e remoto devido a uma condição de falta interna ou externa, que são chamadas de NLFIRST e NRFIRST, respectivamente. Os instantes de tempo são medidos no ponto máximo da TW (pico), como mostrado na Figura 4.11.

Em seguida, conhecendo o instante de tempo associado à primeira onda viajante no terminal local, NLFIRST, é estabelecida uma janela de tempo para detectar o tempo da TW de retorno no terminal remoto, NREXIT, como ilustrado na Figura 4.11. Da mesma maneira, conhecendo o instante de tempo associado à primeira onda viajante no terminal remoto, NRFIRST, é estabelecida uma janela de tempo para detectar o tempo da TW de retorno no terminal local, NLEXIT. Essas janelas possuem um tamanho igual ao tempo de propagação de sequência positiva da linha (τ) e são posicionadas após a primeira onda viajante de corrente, como é observado na Figura 4.11. É incluída uma margem, $\Delta\tau$ igual a 20 μ s, para considerar o erro e variações no tempo de propagação.

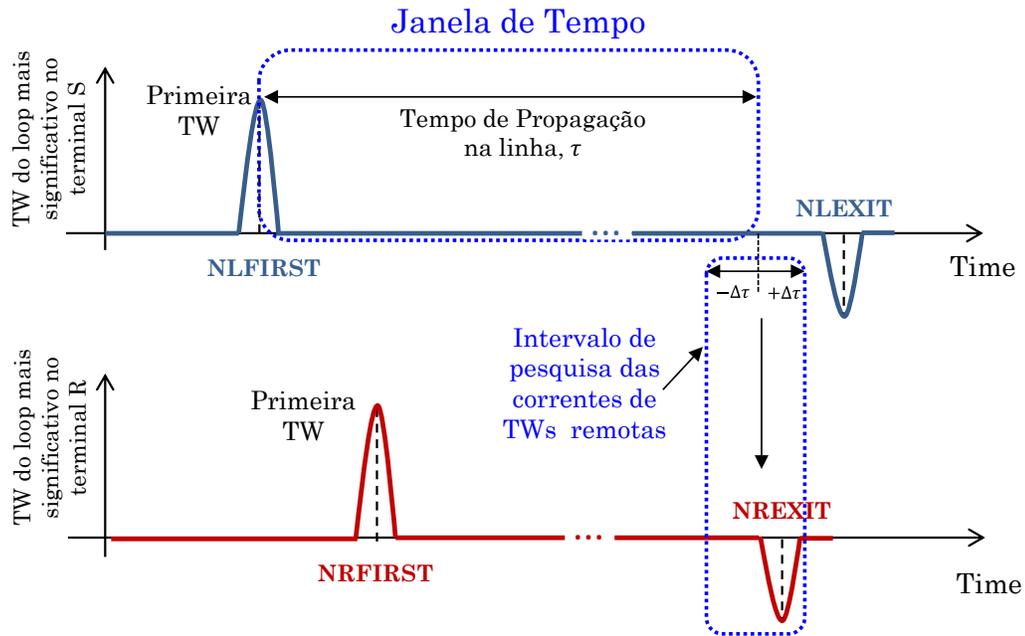


Figura 4.11: Obtenção das amostras de tempos FIRST e EXIT das TW de corrente para o elemento TW87

Com a inspeção dos registros das TWs na fronteira final da janela de tempo são identificadas as amostras de tempo NLEXIT e NREXIT do terminal local e remoto, respectivamente.

Após o cálculo das quatro amostras de tempo (NLFIRST, NRFIRST, NLEXIT e NREXIT), calculam-se os sinais de TWs de corrente no terminal local e remoto usando M amostras dentro de metade da janela do filtro DS ($M < 0,5 \cdot T_{DS}$).

$$i_L = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL(NLFIRST-k)} \right| \quad (4.13)$$

$$i_R = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR(NRFIRST-k)} \right| \quad (4.14)$$

O valor da constante C é selecionado para manter um ganho unitário nos valores de (4.13) e (4.14) ($C = 0,10417$).

Portanto a corrente de operação é calculada com:

$$i_{OP} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NLFIRST-k)} + i_{TWR(NRFIRST-k)}) \right| \quad (4.15)$$

A lógica da função diferencial TW87 não trabalha por fase, mas sim com o modo de propagação aéreo (*alfa* ou *beta* - obtidos da transformação de Clarke) de corrente de operação mais significativo. Portanto, são apresentadas as relações entre as TWs de corrente no domínio das fases e as TWs de corrente no domínio modal:

$$i_{TW0} = (1/3)(i_{TWA} + i_{TWB} + i_{TWC}) \quad (4.16)$$

$$i_{TW1A} = i_{TWA} - i_{TW0} \quad (4.17)$$

$$i_{TW1B} = i_{TWB} - i_{TW0} \quad (4.18)$$

$$i_{TW1C} = i_{TWC} - i_{TW0} \quad (4.19)$$

$$i_{TW2A} = (1/\sqrt{3})(i_{TWB} - i_{TWC}) \quad (4.20)$$

$$i_{TW2B} = (1/\sqrt{3})(i_{TWC} - i_{TWA}) \quad (4.21)$$

$$i_{TW2C} = (1/\sqrt{3})(i_{TWA} - i_{TWB}) \quad (4.22)$$

Os três primeiros (i_{TW1A} , i_{TW1B} e i_{TW1C}) são associados ao modo *alfa* (α) e são bons indicadores para faltas monofásicas AT, BT e CT, respectivamente. Os três restantes (i_{TW2A} , i_{TW2B} e i_{TW2C}) são associados aos modo *beta* (β) e são bons indicadores para faltas bifásicas que envolvem as fases BC, CA e AB, respectivamente. Após obter os seis modos aéreos é calculado e identificado o modo aéreo que produz a maior corrente de operação. O parâmetro TW87MODE indica qual modo foi escolhido.

Utilizando os tempos de chegada (NLFIRST e NRFIRST) das primeiras ondas viajantes de correntes nos terminais local e remoto é determinado o local da falha em pu (em relação ao comprimento da linha) com respeito ao terminal local através da seguinte formulação:

$$TW87FL = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{NLFIRST - NRFIRST}{\tau} \right) \quad (4.23)$$

Então, no caso de uma falta interna o valor de TW87FL deve ser maior do que zero e menor do que 1.

Em seguida é realizado o cálculo da corrente de restrição que varia se a primeira TW de corrente passar pelo terminal local antes do terminal remoto, ou vice-versa. As equações (4.24) e (4.25) são usadas em uma lógica condicional para esses dois casos possíveis, respectivamente.

$$i_{RS_L} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWL(NLFIRST-k)} - i_{TWR(NREXIT-k)}) \right| \quad (4.24)$$

$$i_{RS_R} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} (i_{TWR(NRFIRST-k)} - i_{TWL(NLEXIT-k)}) \right| \quad (4.25)$$

Essa corrente de restrição é calculada para o modo aéreo que foi escolhido em TW87MODE.

Portanto, para que o esquema diferencial TW87 opere adequadamente deve-se ter uma corrente de operação maior do que a corrente de restrição ($i_{OP} > k \cdot i_{RS}$), sendo k um fator de restrição, que define a sensibilidade da função. O valor de TW87FL deve ser maior do que zero e menor do que 1.

Além dessas condições que definem a adequada operação do elemento diferencial TW87, é aplicada uma condição de segurança para faltas externas em linhas paralelas. O esquema verifica se as polaridades da corrente de operação e da tensão pré-falta no ponto de falta são iguais. Por exemplo, no caso de falta interna quando a tensão pré-falta passa pelo semi-ciclo positivo, a tensão no ponto de falta diminui gerando-se TWs de corrente com polaridade negativa que viajam até os terminais da linha e entram pela não polaridade dos TCs, fazendo com que o relé meça TW de corrente com polaridade positiva. Como resultado, para uma falta interna se espera um valor positivo de corrente de operação quando a tensão pré-falta no ponto de falta é positiva, e uma polaridade negativa na corrente de operação quando a tensão pré-falta no ponto de falta for negativa.

O valor da tensão pré-falta no ponto de falta pode ser calculado com TW87FL que foi obtido com os tempos de chegada das primeiras TWs (equação (4.23)) e com ajuda da Figura 4.12 pode-se deduzir a equação (4.26) que faz uso dos valores das tensões local e remota instantânea medidas antes da falha.

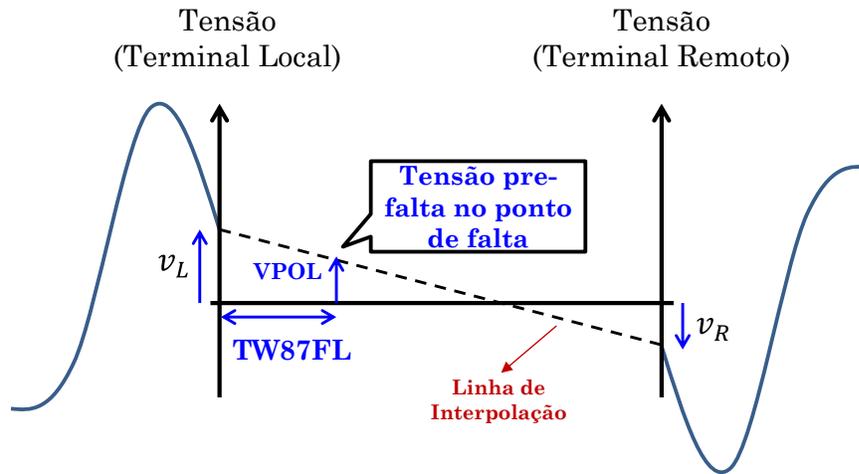


Figura 4.12: Princípio de Operação da Tensão de Polarização

$$VPOL = v_L \cdot (1 - TW87FL) + TW87FL \cdot v_R \quad (4.26)$$

Portanto, mais uma condição deve ser atendida para que o esquema TW87 opere. O critério está relacionado com as polaridades da tensão de polarização VPOL (tensão pré-falta no ponto de falta, estimado) e da corrente de operação i_{OP} que devem ser iguais.

4.4. IMPLEMENTAÇÃO DO ESQUEMA DE DISPARO

Com a implementação dos quatro elementos de proteção baseados em grandezas incrementais, TD32 e TD21; e baseados em ondas viajantes, TW32 e TW87, foi implementada uma lógica de disparo baseada na referência (SEL T400L, 2017) que combina seus princípios operacionais para conseguir tempos de operação mais rápidos através de um esquema assistido por comunicação. Os elementos de proteção são combinados dentro de uma lógica de disparo para processar a saída do *trip*, enviar e receber sinais de disparo de transferência permissivos e diretos.

Conforme é mostrado na Figura 4.13, a lógica incorpora um disparo independente assistido por comunicações dos esquemas POTT (*Permissive Overreach Transfer Trip*) e DTT (*Direct Transfer Trip*); e uma lógica de disparo incondicional na qual são embutidos os elementos de proteção TD21P, TD21G e TW87, de modo que se qualquer um desses elementos for liberado através de uma lógica OR é iniciado um disparo definitivo (TRIP).

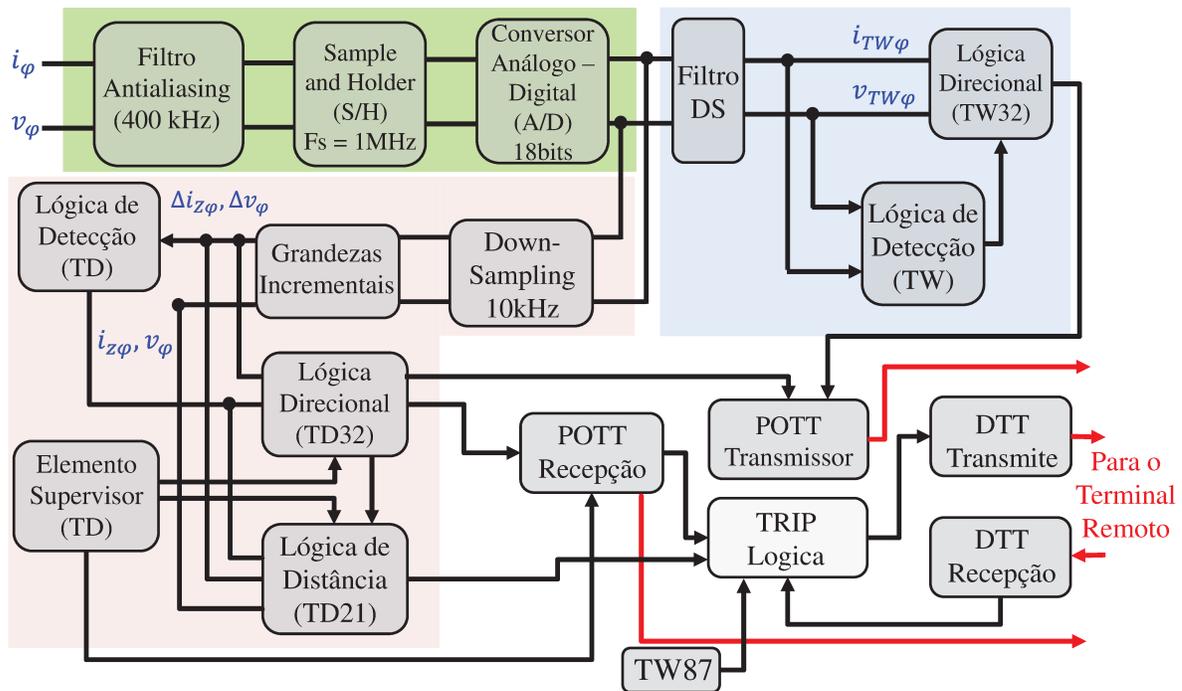


Figura 4.13: Modelo computacional do relé no domínio do tempo.

Por questões de segurança e confiabilidade na operação dos elementos de proteção no domínio do tempo são incluídas condições de segurança adicionais. Uma das razões é a sensibilidade para eventos de baixa energia (eventos não relacionados com um defeito). Assim, a operação das funções de proteção TW87, TD21, e do esquema POTT é supervisionada através da afirmação dos bits dos elementos de sobrecorrente rápidos OC87, OC21, e OCTP, respectivamente. Estes elementos respondem às correntes de *loop* de réplica incremental e medem o nível de corrente no espectro de baixa frequência. Eles são implementados no domínio do tempo e não são afetados pelo decaimento da corrente de falta devido ao componente CC ou pelo valor de tensão próximo a zero no instante do defeito. A lógica implementada de acordo com (SEL T400L, 2017) integra a corrente de réplica incremental, Δi_z , e a compara com o limite do *pick-up* do elemento, conforme ilustrado na Figura 4.14. Se a magnitude de Δi_z exceder o limite de *pick-up* definido, a integral de Δi_z supera o limite de *pick-up* indicado pela linha reta, e assim os elementos de sobrecorrente supervisores OC87, OC21, e OCTP apresentam um valor não nulo. Caso contrário, se a magnitude de Δi_z for menor do que o limite de ajuste do *pick-up*, a integral de Δi_z se mantém abaixo do *pick-up* e assim os elementos de sobrecorrente OC87, OC21, e OCTP não são afirmados.

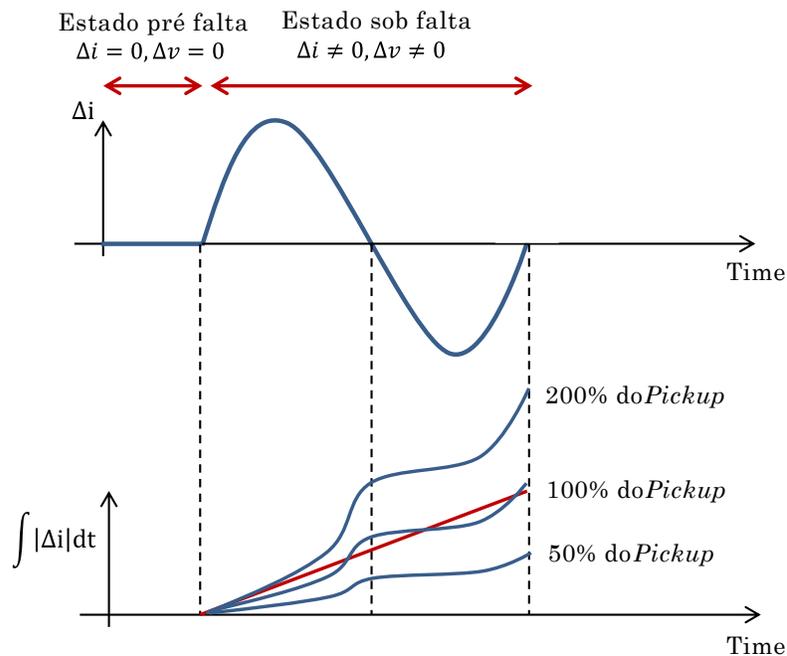


Figura 4.14: Princípio de Operação do elemento de Sobrecorrente Instantâneo (SEL T400L, 2017).

4.4.1. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO ESQUEMA POTT

Nesta seção descreve-se a implementação do esquema assistido por comunicação, POTT (*Permissive Overreaching transfer trip*), que faz uso dos elementos de proteção direcionais TW32 e TD32. Estes elementos trabalham em conjunto para fornecer um esquema permissivo de sobrealcance rápido e seguro, aproveitando a rapidez do elemento TW32; e a confiabilidade e segurança do elemento TD32.

Pela própria natureza, os elementos TW32 são rápidos e muito sensíveis para detectar eventos de baixa energia que possam comprometer a segurança do esquema de disparo. Em contrapartida, os elementos TD32 não são tão rápidos quanto os elementos TW32, mas são muito seguros e confiáveis. Portanto, baseando-se na referência (GUZMÁN et al., 2018) é implementado um esquema POTT fornecendo um disparo independente combinando o uso destes elementos.

A. Lógica do Transmissor Chave

A lógica do transmissor chave ativa os bits de transmissão por fase (KEYA, KEYB, KEYC) para enviar um sinal permissivo indicando a presença de um evento à frente para o relé remoto, ver Figura 4.15. A lógica usa os elementos direcionais diretos por fase TD32F e TW32F,

na qual o elemento TW32 acelera o envio do sinal permissivo e não é crítico para a confiabilidade do relé, por exemplo, quando ocorre faltas no cruzamento perto de zero de tensão. O elemento TD32 opera de forma confiável e rápida para faltas em qualquer ponto da onda e para faltas resistivas, pois sua sensibilidade é definida pela supervisão de sobrecorrente, OCTP, embutida na lógica POTT.

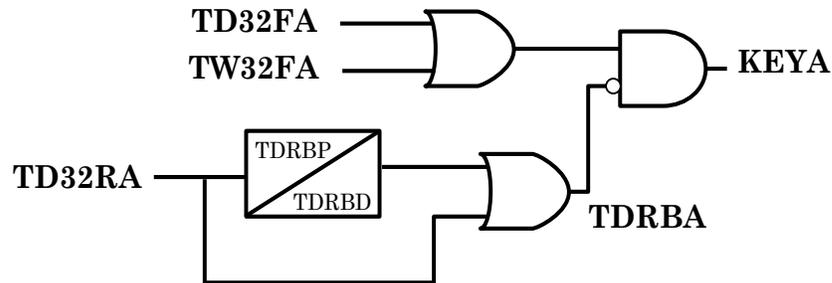


Figura 4.15: Lógica chave do transmissor para acelerar o esquema POTT – fase A (SEL T400L, 2017)

Além disso, a lógica da chave POTT ativa o bit TD32R quando o elemento TD32 detecta a ocorrência de um evento reverso (na fase A: TD32RA) para bloquear a transmissão do sinal permissível. Se a indicação do evento reverso durar mais do que um período de tempo muito curto, TDRBP = 3 ms, o bit TD32R permanece ativado por um tempo extra, TDRBD = 80 ms, após isto o TD32R é desativado. O atraso TDRBD fornece tempo suficiente para que os elementos de sobrealcançe remoto e o canal de comunicação sejam redefinidos após o cancelamento da falta reversa anterior.

B. Lógica do Receptor

O relé local recebe os bits permissivos por fase (PTA, PTB e PTC) através do canal de comunicação. Esses sinais são supervisionados pela indicação direta do elemento TD32, mas não pela indicação direta do TW32. Os sinais permissivos chegam após um atraso do canal e, nesse momento, os elementos TD32 já foram ativados e o esquema não precisa da aceleração do TW32. Por não usar o elemento TW32 na extremidade de recepção, o esquema é mais seguro. Os elementos de sobrecorrente por fase, através do uso dos bits OCTPA, OCTPB e OCTPC, supervisionam o sinal de disparo permissivo do esquema POTT para segurança durante as operações de comutação, como ilustra a Figura 4.16. Os bits de corrente reversa (TDRBA, TDRBB e TDRBC) supervisionam o sinal de disparo permissivo do esquema POTT para segurança durante a limpeza de uma falta em uma linha paralela. O bit PTRXA permissivo

supervisionado pela fase A é ativado se houver uma condição de sobrecorrente na fase A, e se o bit de inversão e se a corrente reversa correspondente não forem declarados positivos.

A lógica do receptor estende a afirmação do bit TD32F (a combinação OR de TD32FA, TD32FB e TD32FC) de acordo com o temporizador de atraso de canal de comunicações COMCHD (por exemplo, 15 ms) para indicar a presença de um evento à frente. Esta extensão garante que a indicação do evento à frente local baseado em grandezas incrementais esteja presente quando o sinal permissivo do *trip* remoto for recebido após o atraso do canal. A lógica também estende os bits OCTPA, OCTPB e OCTPC pelo mesmo motivo. Uma condição de disparo do esquema é concedida quando pelo menos um dos bits PTRX é acionado e a indicação de um evento local à frente TD32F é declarada.

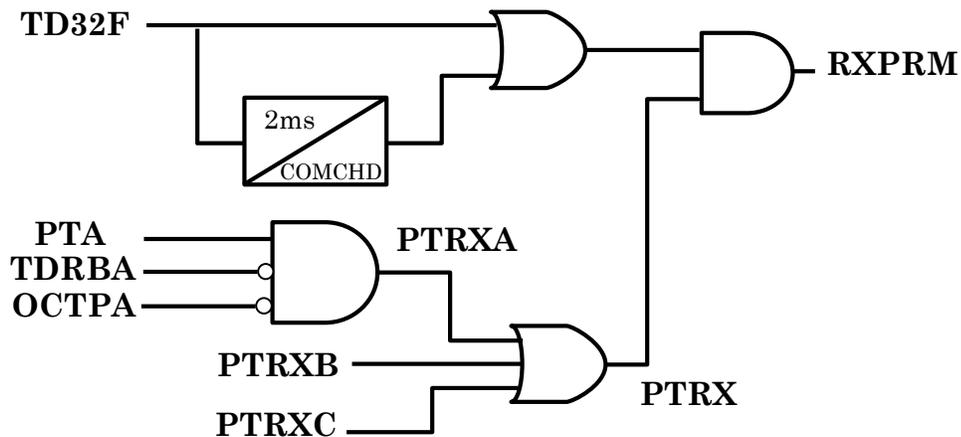


Figura 4.16: Lógica do receptor do esquema POTT- fase A (SEL T400L, 2017)

Neste capítulo foram abordadas características importantes das lógicas e algoritmos que faz parte da implementação do relé digital no domínio do tempo na MODELS-ATP. Baseado nas referências (SCHWEITZER et al., 2016; SEL, 2017) foram construídos cada bloco através da linguagem de programação MODELS de modo a promover a simulação de *Software-in-the-Loop* (SIL). Descreveu-se a aquisição e processamento dos sinais de tensão e corrente que vem dos TPs e TCs, assim como as lógicas de detecção dos elementos de proteção TD e TW. Foi discutida a modelagem do filtro DS, que serve para a extração dos sinais TW de tensão e corrente que são utilizados pelos elementos TW (TW32 e TW87). Além disso, foram descritas as lógicas dos quatro elementos TW32, TW87, TD32 e TD21 implementadas de acordo como o reportado na literatura especializada (SEL, 2017). Em seguida, se apresentou a implementação da lógica de disparo que combina estes elementos para fornecer um trip confiável, seguro e sobretudo veloz,

que usa a afirmação de uma lógica OR dos bits provenientes dos esquemas POTT, DTT, TW87 e TD21G.

CAPÍTULO V

APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações digitais realizadas no programa ATP com o objetivo de avaliar o desempenho da proteção de linha no domínio do tempo com os modelos desenvolvidos. Os estudos são divididos em duas categorias: proteção baseada em grandezas incrementais (TD21 e TD32) e proteção baseada em ondas viajantes (TW87 e TW32). As análises foram efetuadas através de simulações de casos pontuais de falta e simulações em massa.

Para as simulações dos casos de falta dos elementos de proteção TD (ver Tabela 5.1) implementou-se o sistema teste 525 kV da Figura 5.1 que é composto por duas fontes de tensão S1 e S2 com suas respectivas impedâncias equivalentes, uma linha de transmissão de 220 km composta por dez trechos de 22 km perfeitamente transpostos e duas linhas adjacentes de dois circuitos de 20 km cada um, para maior detalhe ver o Apêndice A. Todas as linhas são balanceadas e foram simuladas com o modelo que representa a dependência dos parâmetros longitudinais em função da frequência no domínio modal (JMarti), disponível no programa ATP. O sistema foi simulado com um passo de integração de 0,1 μ s.

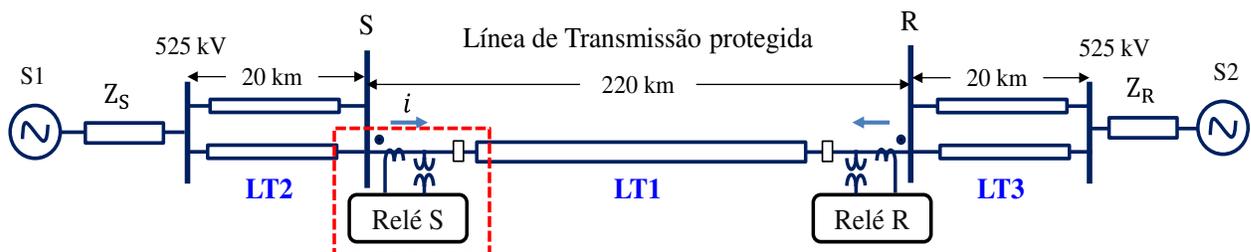


Figura 5.1: Sistema teste 01 de 525 kV implementado no programa ATP

Tabela 5.1: Casos de Falta simulados para testar a Proteção Baseada em Grandezas Incrementais (TD)

Tipo	CASO
Pontual	01. Curto-circuito Interno Monofásico AT na LT1, no ponto 04
	02. Curto-circuito Interno Bifásico CAT na LT1, no ponto 01
	03. Curto-circuito Interno Monofásico BT na LT1, no ponto 05 com Resistência de Falta Variável
	04. Curto-circuito Externo Bifásico BC na LT2
	05. Curto-circuito Interno Monofásico CT na LT1, no ponto 05 com Ângulo de Incidência Variável
Massa	01. Influência da Resistência de Falta no Elemento de Proteção TD21
	02. Influência do Ponto na Onda de Tensão de Falta nos elementos TD21 e TD32
	03. Impacto do SIR nos Elementos de Proteção TD21 e TD32

Nos terminais local e remoto da linha de transmissão são instalados transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs, ideais) para fornecer os sinais analógicos aos relés proteção em S e R, respectivamente.

As grandezas elétricas mais importantes do sistema da Figura 5.1 são apresentadas na Tabela 5.2, e foram utilizadas para os ajustes dos relés de proteção. As impedâncias equivalentes das fontes foram modificadas em cada caso individual simulado através do SIR (Source Impedance Ratio) que é a relação entre a impedância da fonte com respeito à impedância da linha. Considera-se a mesma relação do SIR para a sequência positiva e zero.

Tabela 5.2: Parâmetros da linha protegida do sistema teste 01 em análise

Parâmetro	Descrição	Valor
Vn	Tensão nominal	525 kV
L	Comprimento da linha	220 km
Z1MAG	Impedância de Sequência Positiva	10,38 \angle 86° Ohm.sec
Z0MAG	Impedância de Sequência Zero	35,28 \angle 77° Ohm.sec
RTP	Relação de transformação de tensão	4565,22
RTC	Relação de transformação de corrente	600
δ	Ângulo de carregamento	8°

Os valores apresentados da impedância de sequência positiva e zero da linha estão em valores secundários calculados para 60 Hz.

Para as simulações dos casos de falta dos elementos de proteção TW (ver Tabela 5.3) foi utilizado o sistema teste proposto pelo *IEEE Protective Relaying Committee* (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004), conforme representado na Figura 5.2. A tensão nominal do sistema é de 230 kV, sendo este sistema adequado para testar a maioria das aplicações de proteção de LT. O sistema tem vários componentes, entre eles S1 e S3 correspondem às fontes de tensão no sistema elétrico, S2 corresponde a uma máquina síncrona de 830 MVA. Nas simulações desta dissertação o disjuntor da linha alimentada pela fonte S3 será sempre mantido aberto de forma que a LT de circuito duplo possuirá apenas dois terminais de medições. Cada uma das LT é composta por três trechos de 24 quilômetros de comprimento. Os parâmetros elétricos de cada um dos componentes do sistema são descritos na referência (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004) e reproduzidos no Apêndice A. Todas as linhas são balanceadas e foram simuladas com o modelo que representa a dependência dos parâmetros longitudinais em função da frequência no domínio modal (JMarti), disponível no programa ATP. O sistema foi simulado com um passo de integração de 0,1 μ s.

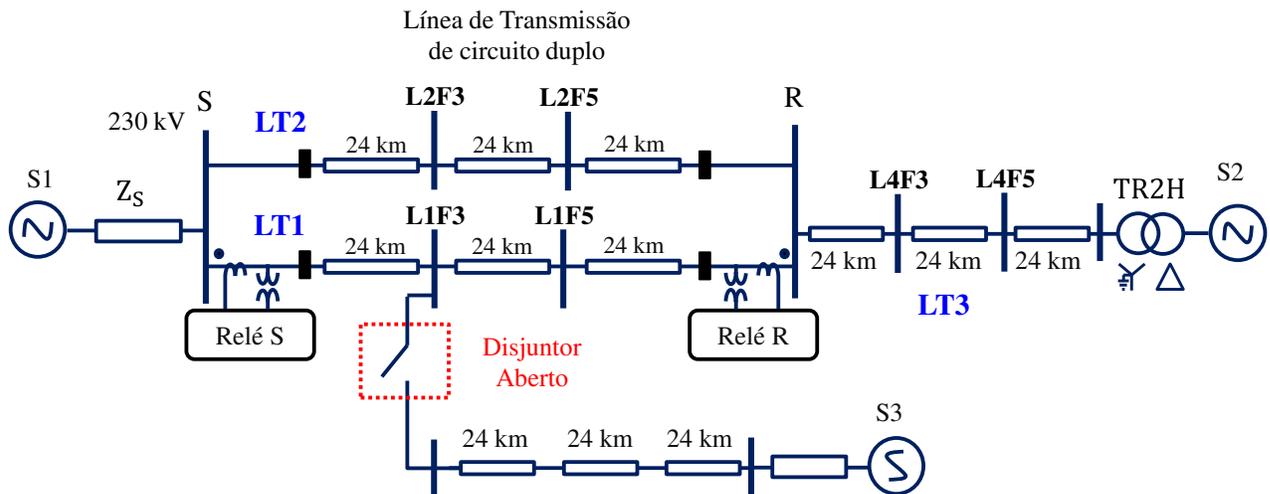


Figura 5.2: Sistema teste de 230 kV proposto pelo IEEE Power System (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004)

Tabela 5.3: Casos de Falta simulados para testar a Proteção Baseada em Ondas Viajantes (TW)

Tipo	CASO
Pontual	06. Curto-circuito Interno Monofásico AT na LT1, no ponto L1F3 com Ângulo de Incidência 90°
	07. Curto-circuito Interno Bifásico BCT na LT1, no ponto L1F3 com Ângulo de Incidência 60°
	08. Curto-circuito Externo Monofásico BT na LT3, no ponto L4F5 com Ângulo de Incidência 240°
	09. Curto-circuito Externo Bifásico CA na LT2, no ponto L2F5 com Ângulo de Incidência 120°

5.1. DESEMPENHO DA PROTEÇÃO BASEADA EM GRANDEZAS INCREMENTAIS (TD)

Nesta seção apresentam-se casos pontuais de falta simulados que incluem a variação da localização da falta, do tipo de falta, do ângulo de incidência (ponto na onda de tensão), da resistência de falta e do SIR, com o objetivo de validar o desempenho da proteção direcional TD32 e da proteção de distância TD21 fazendo uso do sistema teste da Figura 5.1. A linha foi dividida em dez trechos dando lugar aos pontos N01 até N09. Também serão realizadas simulações em massa fazendo uma varredura das diferentes condições do defeito, permitindo obter uma avaliação do desempenho da proteção mais profunda. Cabe ressaltar que o início da falta é considerado como o instante em que é aplicado o defeito no ponto de falta com o ângulo de incidência especificado, assim, os tempos de operação dos elementos de proteção são calculados como a diferença entre o tempo em que a proteção operou e o início da falta.

Os ajustes usados para os elementos de proteção TD21 e TD32, e que foram empregados nesta pesquisa, são apresentados na Tabela 5.4. Esses valores estão de acordo com as diretrizes recomendadas pela referência (KASZTENNY et al., 2016).

Tabela 5.4: Ajuste dos elementos de proteção TD21 e TD32

Elemento	Ajuste	Descrição	Ajuste Considerado
TD32	TD32ZF	Limiar de impedância à frente	$0,3 \cdot \text{MIN}(Z1S)$
	TD32ZR	Limiar de impedância reversa	$0,3 \cdot Z1\text{MAG} $
TD21	TD21MP	Alcance para o elemento de distância de fases	0,75
	TD21MG	Alcance para o elemento de distância de terra	0,7

O ajuste TD32ZF é definido como a menor magnitude da impedância do sistema de sequência positiva atrás do relé, assumindo a configuração do sistema local mais forte, por exemplo, $SIR = 0,1$.

5.1.1. SIMULAÇÃO PONTUAL 01: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO AT NA LT1, NO PONTO 04

No primeiro caso pontual simulou-se um curto-circuito monofásico AT franco ($R_f = 0 \Omega$), sendo aplicado no ponto 04 a 88 km do terminal local na linha LT1. A LT é conectada a um sistema relativamente forte com um SIR de 0,45 nos terminais local e remoto. Pode-se observar na Figura 5.3 os sinais por fase de tensão e corrente do lado secundário dos TPs e TCs nos terminais local e remoto. Também são apresentadas as saídas digitais do início da falta e das respostas dos elementos de proteção direcional TD32 e de distância TD21. O elemento direcional à frente TD32F e o elemento de distância de terra TD21G foram ativados como era de se esperar para um curto-circuito interno. O elemento direcional à frente TD32F dos terminais local e remoto responderam em 1,73 ms e 2,33 ms, respectivamente, e o elemento de distância de terra TD21G dos terminais local e remoto responderam em 2,63 ms e 3,63 ms, respectivamente.

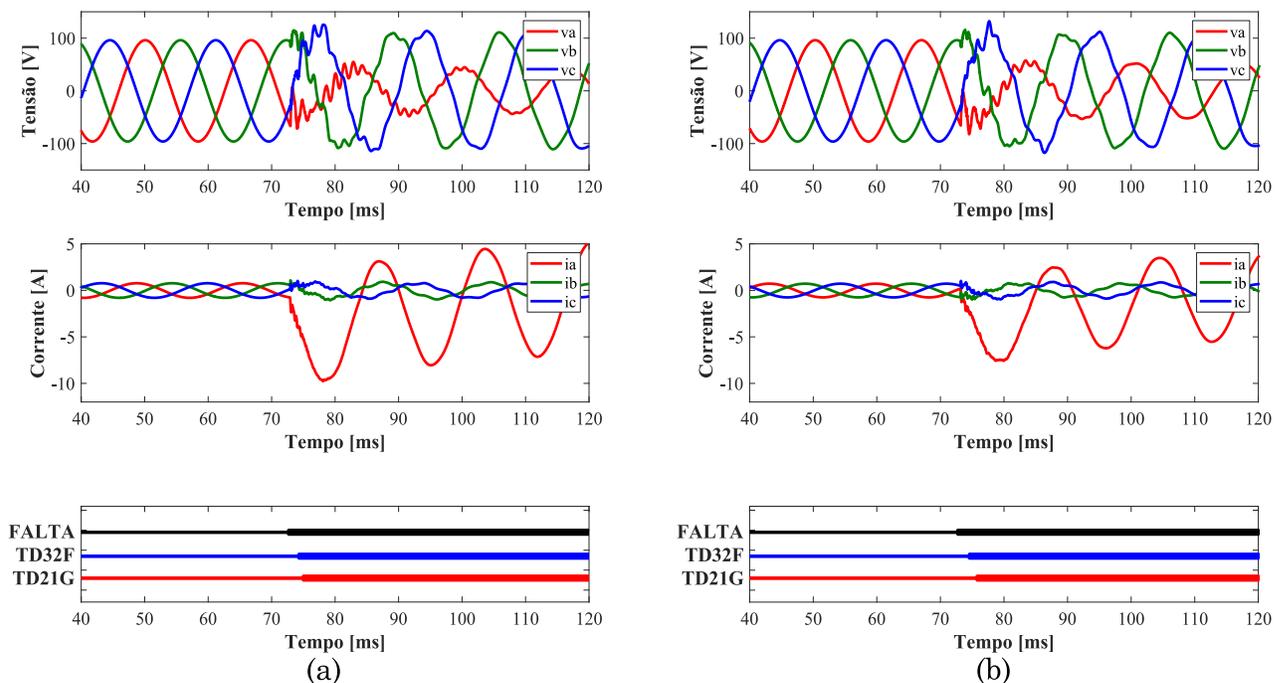


Figura 5.3: Caso 01 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 (a) no terminal local e (b) remoto

Na Figura 5.4 são apresentadas a tensão e a corrente de réplica incremental do *loop* envolvido na falta AT. Pode-se notar que as grandezas incrementais começam a mudar 1 ms após o início da falta, e isto obviamente traz um efeito de retardo no tempo de resposta do elemento. Verifica-se que a tensão incremental e a corrente de réplica incremental possuem polaridades opostas, conforme o esperado para um curto-circuito interno, e como resultado o torque operante (S_{OP}) do elemento direcional TD32 é positivo. Além disso, ilustra-se que o elemento TD32 é confiável (o torque operante S_{OP} , é muito maior do que o torque de restrição positivo S_{FWD}) e seguro (o torque operante está bem acima do torque de restrição negativo S_{REV}).

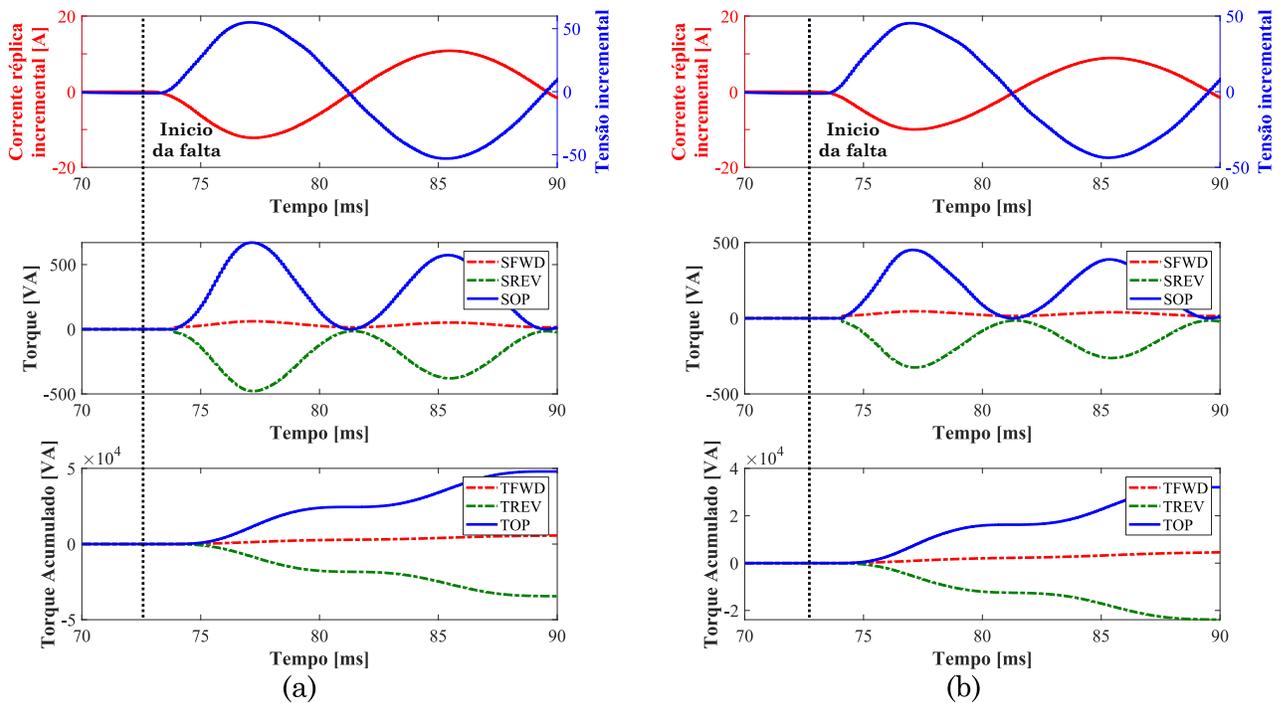


Figura 5.4: Caso 01 – Grandezas incrementais do loop AT, torque e torques acumulado operante e de restrição do elemento TD32 nos terminais (a) local e (b) remoto

Figura 5.5 mostram-se os valores absolutos da tensão operante VOP21 e de restrição VRST21 do elemento de proteção TD21 (*loop* AT) e a diferença de tensão acumulada TDIFF21. Pode-se verificar que o TDIFF21 começa a mudar no instante em que a tensão de operação VOP21 é maior do que a tensão de restrição VRST21. Como o defeito foi mais próximo do terminal local, o sinal operante experimenta uma mudança mais significativa que o do terminal remoto. O elemento de terra TD21G respondeu mais rápido no terminal local, como se observou na Figura 5.3.

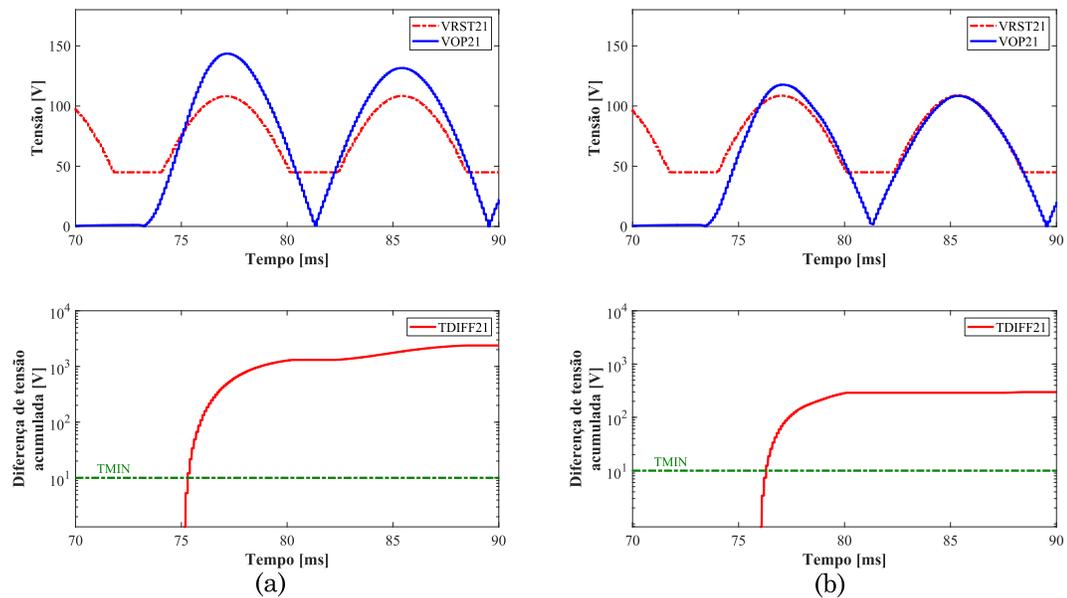


Figura 5.5: Caso 01 - Tensão de operação (VOP21) e de restrição (VRST21), diferença de tensão acumulada (TDIFF21) nos terminais (a) local e (b) remoto

5.1.2. SIMULAÇÃO PONTUAL 02: CURTO-CIRCUITO INTERNO BIFÁSICO CAT NA LT1, NO PONTO N01

No segundo caso pontual, simulou-se um curto-circuito bifásico CAT com uma resistência de falta para terra de 5Ω , sendo aplicado no ponto N01 a 22 km do terminal local na linha LT1. A LT é conectada a um sistema relativamente forte com um SIR de 0,3 nos terminais local e remoto. Pode-se observar na Figura 5.6 os sinais por fase de tensão e corrente do lado secundário dos TPs e TCs nos terminais local e remoto. Também são apresentadas as saídas dos sinais digitais dos elementos de proteção direcional TD32 (elemento direto) e de distância TD21 (elemento de fases). Observa-se que o elemento direcional à frente TD32F dos terminais local e remoto respondem com sucesso em 1,41 ms e 2,21 ms, respectivamente. O elemento de distância de fases TD21P do terminal local responde em 3,91 ms e o elemento TD21P do terminal remoto não opera, porque o defeito caiu fora da sua zona de alcance (TD21MP = 0,75).

Na Figura 5.7 apresentam-se a tensão e a corrente de réplica incremental do *loop* envolvido na falta CA. Consegue-se notar que as grandezas incrementais começam a mudar em 1 ms após o início da falta, e isto obviamente traz um efeito de retardo no tempo de resposta do elemento.

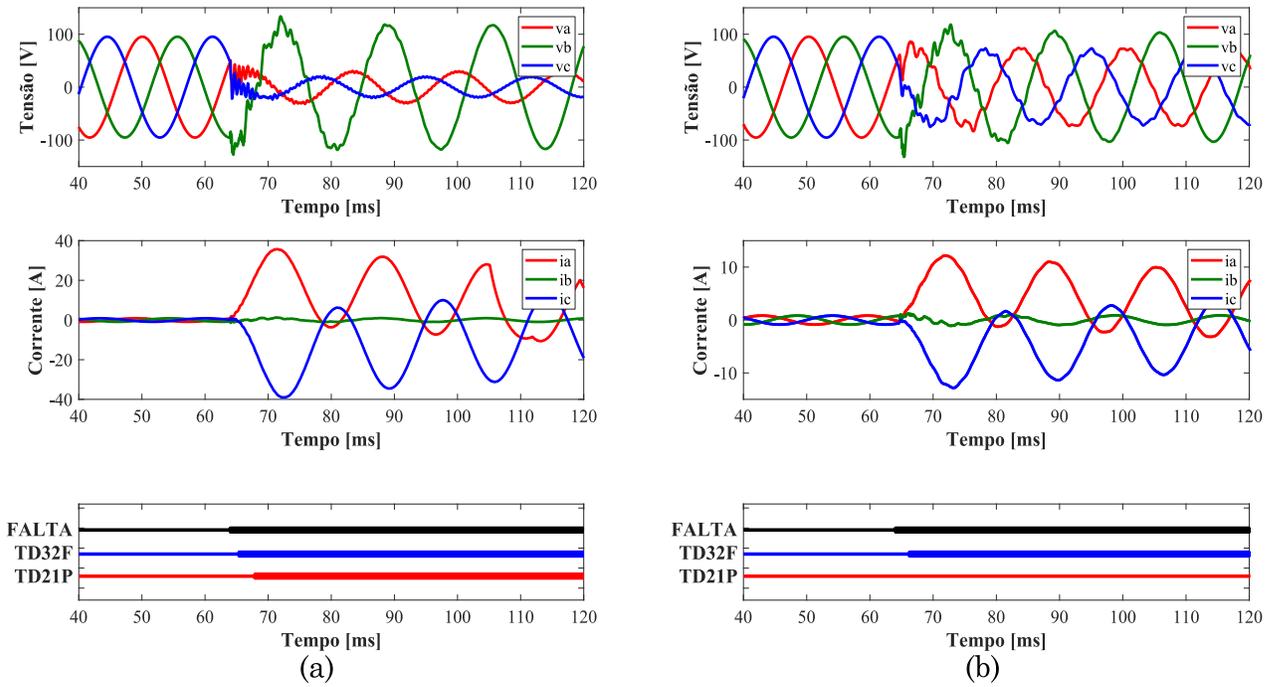


Figura 5.6: Caso 02 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 (a) no terminal local e (b) remoto

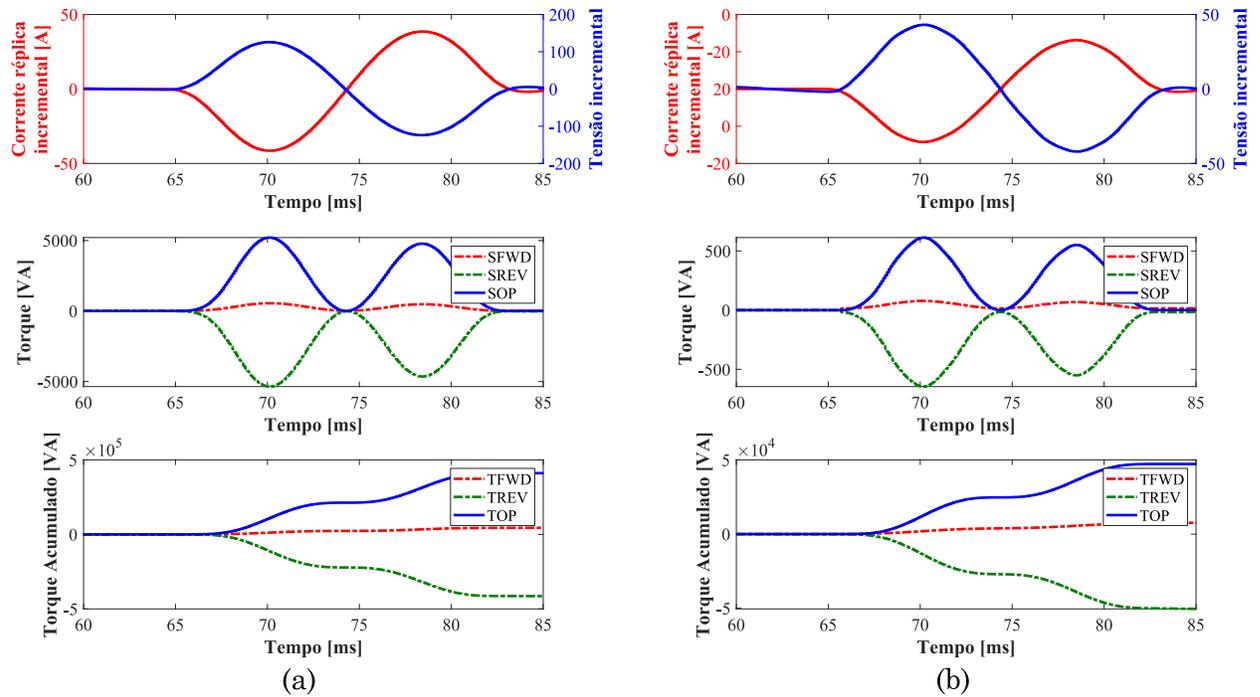


Figura 5.7: Caso 02 – Grandezas incrementais do loop CA, torque e torques acumulado operante e de restrição do elemento TD32 nos terminais (a) local e (b) remoto

Verifica-se que a tensão incremental e a corrente de réplica incremental possuem polaridades opostas, conforme o esperado para um curto-circuito interno, e como resultado o torque operante (S_{OP}) do elemento direcional TD32 é positivo. Além disso, ilustra-se que o elemento TD32 é confiável (o torque operante S_{OP} , é muito maior do que o torque de restrição positivo S_{FWD}) e seguro (o torque operante está bem acima do torque de restrição negativo S_{REV}).

Na Figura 5.8 observam-se os valores absolutos da tensão operante VOP21 e de restrição VRST21 do elemento de proteção TD21 (*loop* CA) e a diferença de tensão acumulada TDIFF21. Pode-se observar que no terminal remoto o sinal operante não consegue superar o valor da tensão de restrição, portanto, não existe uma diferença de tensão acumulada nesse terminal, em consequência o elemento TD21 não opera. Em contrapartida o elemento TD21 do terminal local opera confiavelmente.

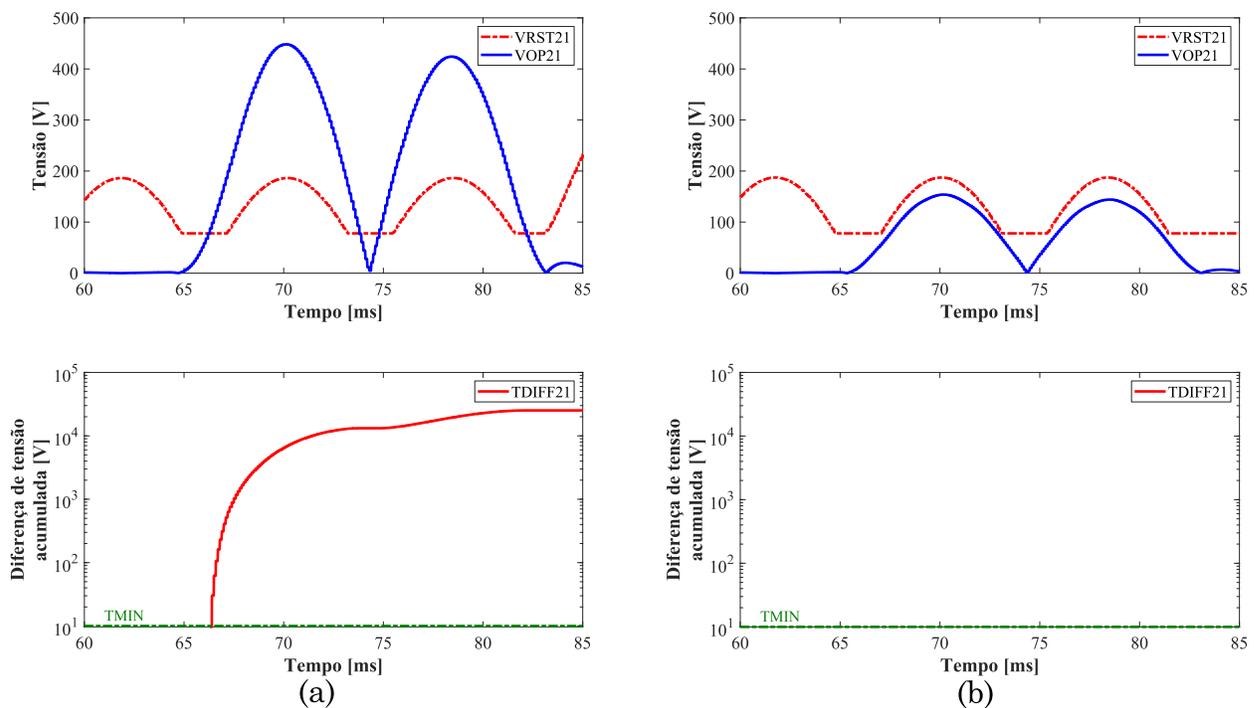


Figura 5.8: Caso 02 - Tensão de operação (VOP21) e de restrição (VRST21), diferença de tensão acumulada (TDIFF21) nos terminais (a) local e (b) remoto

5.1.3. SIMULAÇÃO PONTUAL 03: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO BT NA LT1 NO PONTO N05 COM RESISTÊNCIA DE FALTA 0 Ω E 50 Ω

Nesse caso pontual é avaliado o desempenho do elemento de proteção TD21 quando ocorrem faltas francas ($R_f = 0 \Omega$) e faltas resistivas ($R_f = 50 \Omega$). É aplicado um curto-circuito

monofásico BT na LT1 no ponto N05 a 66 km do terminal local. A LT é conectada a um sistema relativamente forte com um SIR de 0,5 nos terminais local e remoto. Os sinais são registrados no relé localizado no terminal local. Na Figura 5.9 se mostram os valores absolutos da tensão de operação VOP21 e de restrição VRST21 do elemento TD21 (*loop* BT), a diferença de tensão acumulada TDIFF21 e as saídas dos sinais digitais do elemento de proteção TD21 (elemento de terra).

Pode-se notar que o sinal de operação VOP21_R0 (falta franca) supera mais rapidamente o sinal de restrição do que o sinal de operação VOP21_R50 (falta resistiva). O elemento TD21 apresentou tempos de atuação em 2,98 ms e 6,28 ms com resistência de falta 0Ω e 50Ω , respectivamente.

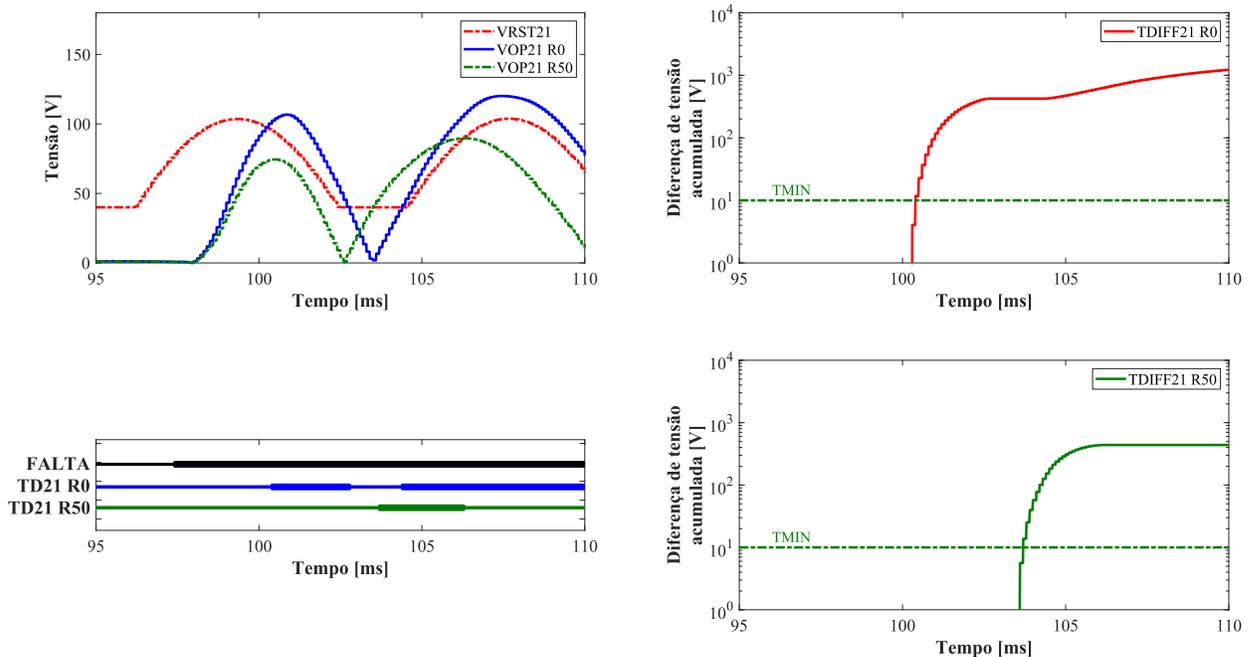


Figura 5.9: Caso 03 – Sinais de restrição e operante, diferença de tensão acumulada e resposta do elemento TD21 ante a variação da resistência de Falta, $R_f = 0 \Omega$ (cor vermelha) e $R_f = 50 \Omega$ (cor verde)

Como esperado o relé atua corretamente para os dois casos, mas demora mais para o caso com maior resistência de falta (o dobro do tempo). Uma análise mais extensa é apresentada a seguir.

5.1.4. SIMULAÇÃO EM MASSA 01: INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DE FALTA NO ELEMENTO DE PROTEÇÃO TD21

Nesse primeiro caso de simulação em massa inspeciona-se a resposta do elemento TD21 variando a resistência de falta em diferentes pontos da linha LT1, realiza-se uma extensa varredura de curtos-circuitos monofásicos AT, BT e CT em três pontos da onda de tensão variando a distância à falta cada 10% do comprimento da linha. A LT é conectada a um sistema forte ($SIR = 0,1$), dando um total de 243 simulações de falta. O alcance do elemento de terra TD21MG é ajustado a 0,70.

São registrados os tempos médios de operação que são representados através de um gráfico com diagrama de barras. Conforme mostrado na Figura 5.10, pode-se observar que os tempos médios de operação do elemento TD21 são menores para defeitos próximos ao relé e maiores para faltas resistivas ou próximas do limite de atuação (do alcance ajustado).

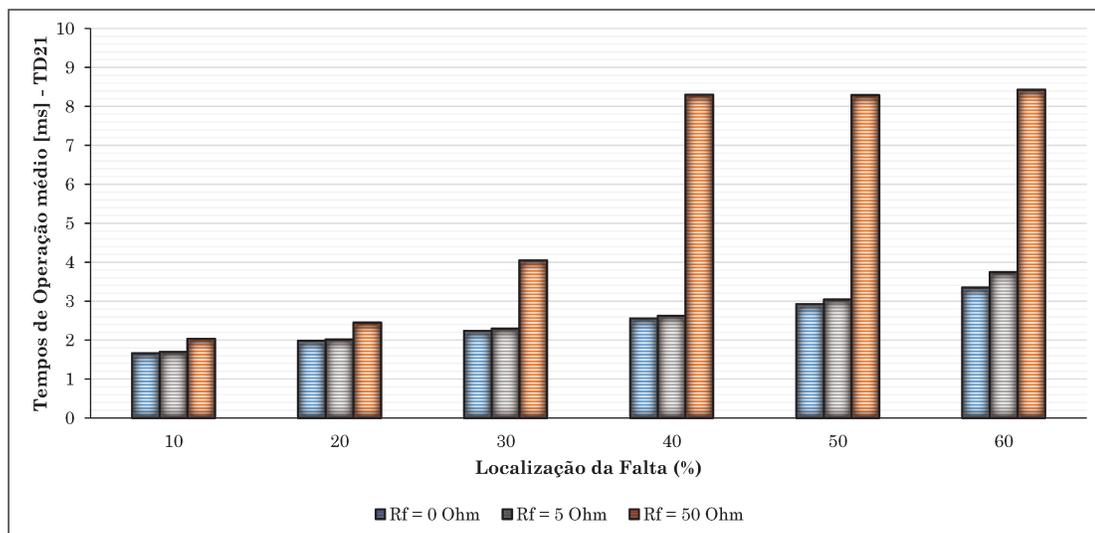


Figura 5.10: Tempos de Operação médio do elemento TD21 em função da resistência de falta ao variar a localização do defeito.

5.1.5. SIMULAÇÃO PONTUAL 04: CURTO-CIRCUITO EXTERNO BIFÁSICO BC NA LT2

Nesse caso pontual simulou-se um curto-circuito bifásico BC com uma resistência de falta entre fases de 5Ω , sendo aplicado na linha adjacente LT2 a 10 km do terminal local da linha LT1. A LT é conectada a um sistema com um SIR de 0,35. O elemento reverso TD32R do terminal local responde em 1,36 ms e o elemento direto TD32F do terminal remoto responde em

2,07 ms. O elemento de fases TD21P no terminal local não opera porque é um elemento supervisionado pelo elemento direcional direto TD32F. O elemento TD21P no terminal remoto está fora da sua zona de alcance, portanto, não atua. Os sinais são apresentados na Figura 5.11.

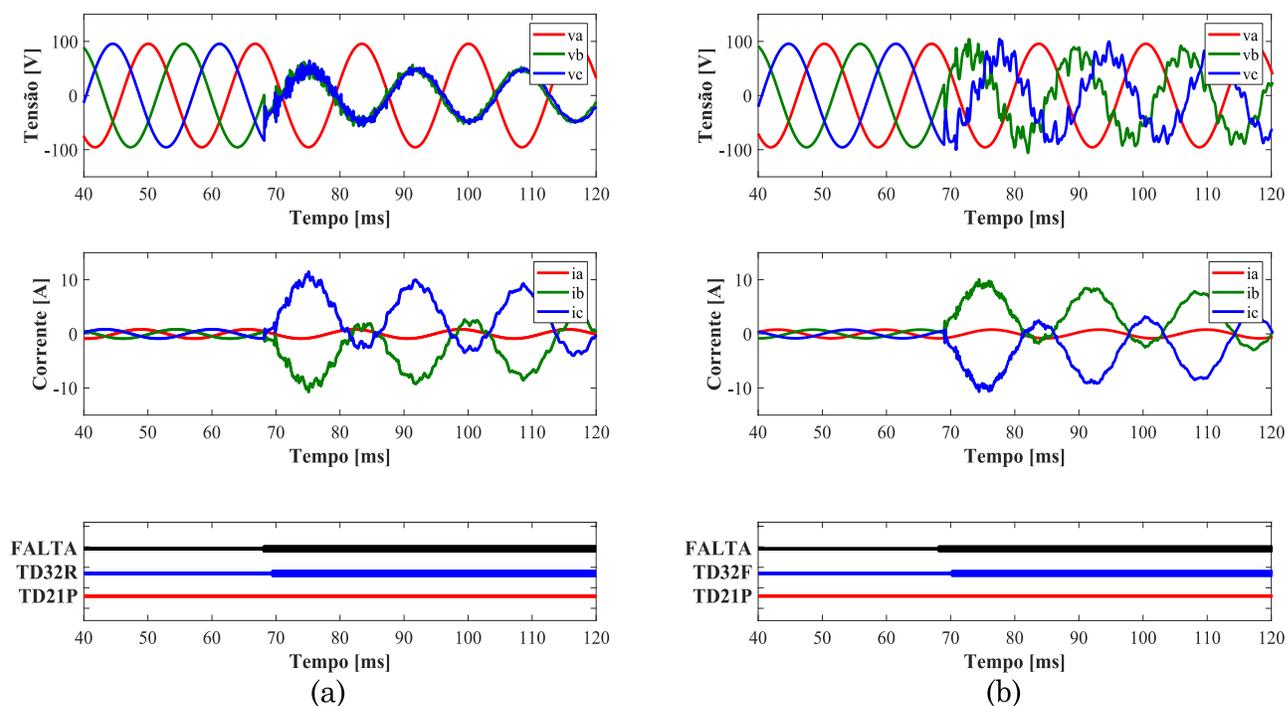


Figura 5.11: Caso 04 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 (a) no terminal local e (b) remoto

Em seguida na Figura 5.12 apresentam-se a tensão e a corrente de réplica incremental do *loop* envolvido na falta BC. Verifica-se que a tensão incremental e a corrente de réplica incremental possuem as mesmas polaridades no terminal local, conforme o esperado para um curto-circuito reverso para o relé local. Como resultado o torque operante (S_{OP}) do elemento direcional TD32 é negativo. E no terminal remoto as grandezas incrementais possuem distintas polaridades, conforme o esperado para um curto-circuito à frente do relé localizado nesse terminal.

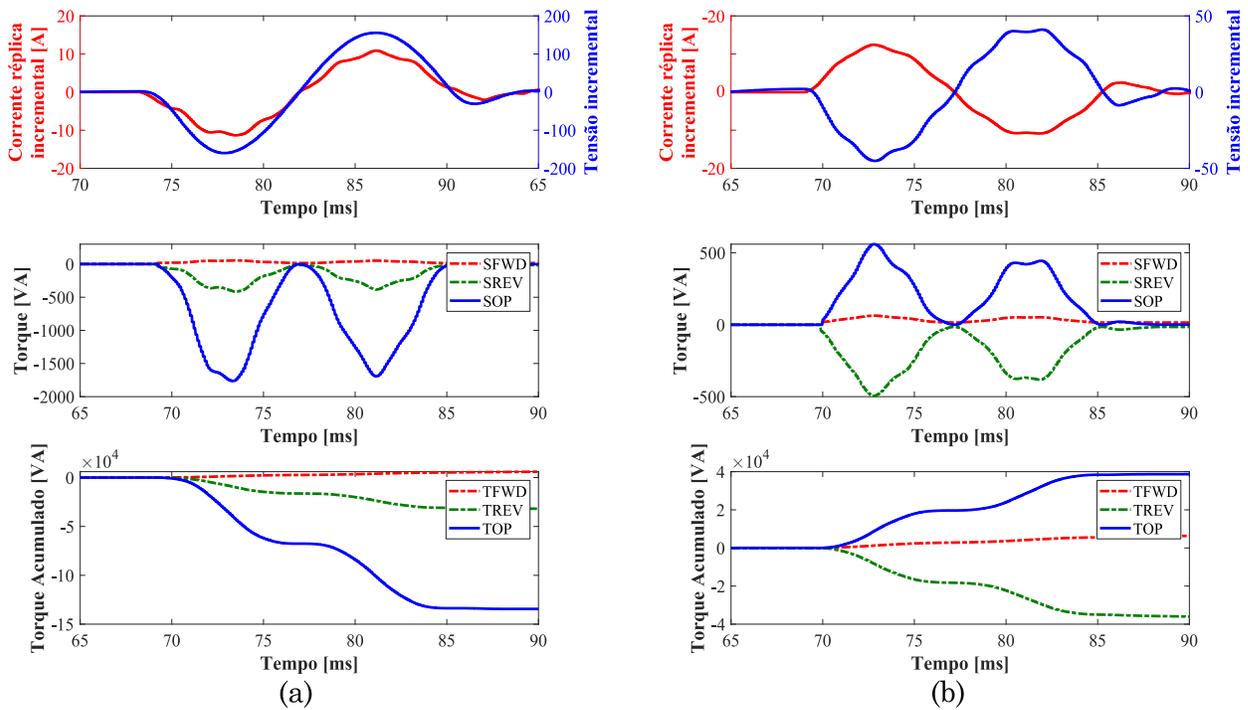


Figura 5.12: Caso 04 – Grandezas incrementais do loop BC, torque e torques acumulado operante e de restrição do elemento TD32 nos terminais (a) local e (b) remoto

5.1.6. SIMULAÇÃO PONTUAL 05: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO CT NO PONTO 05 COM VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

Nesse caso pontual, simularam-se curto-circuitos monofásicos CT de resistência de falta de 1Ω , sendo aplicados no ponto 05 a 110 km do terminal local da linha LT1 para dois pontos diferentes na onda de tensão (ponto máximo e ponto na qual apresenta um valor negativo). A LT se conecta a um sistema com um SIR de 1. Os sinais são registrados no relé localizado no terminal local. Pode-se observar na Figura 5.13 os sinais por fase de tensão e corrente do lado secundário dos TPs e TCs dos dois casos simulados. Também são apresentadas as saídas dos sinais digitais dos elementos de proteção direcional TD32 (elemento direto) e de distância TD21 (elemento de terra). O elemento TD21G respondeu em 3,32 ms e 5,26 ms para o ponto máximo da tensão e para um valor negativo da tensão, respectivamente. Por outro lado, elemento direto TD32F respondeu em 1,52 ms e 2,16 ms. Pode-se observar um maior atraso na operação do elemento TD21 aproximadamente de 2 ms que é função do ponto da onda de tensão em que é aplicada a falta.

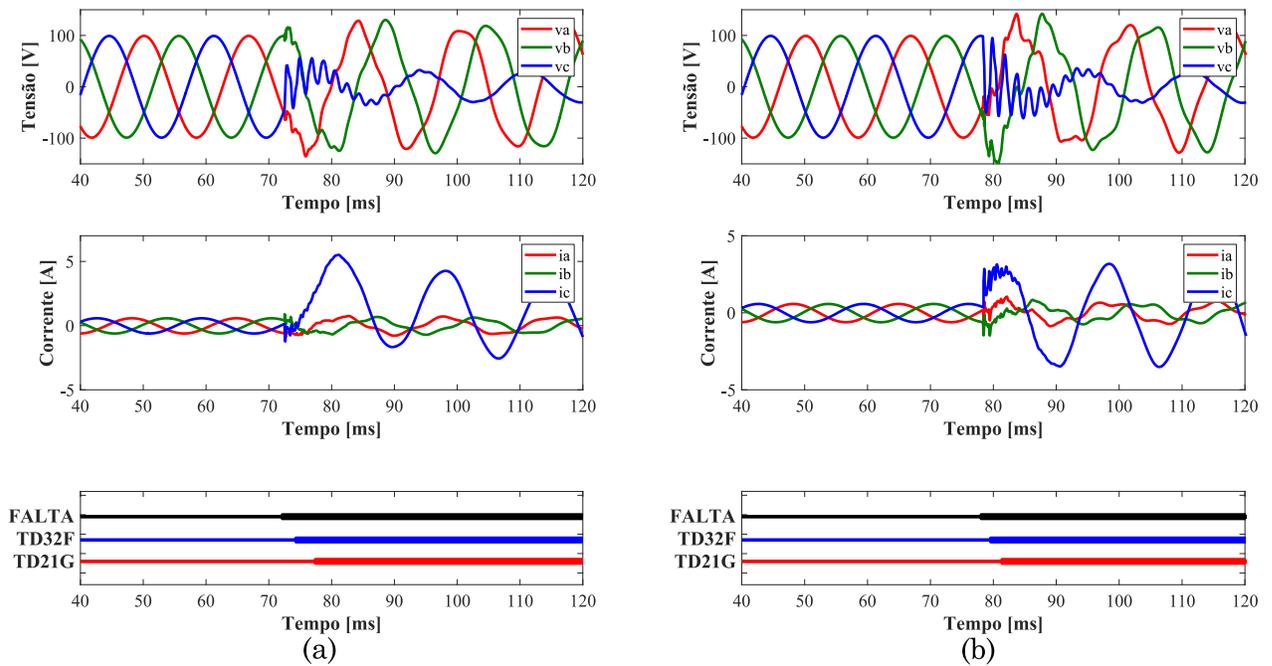


Figura 5.13: Caso 05 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TD32 e TD21 para níveis de tensão (a) com um valor negativo e (b) com um ponto máximo

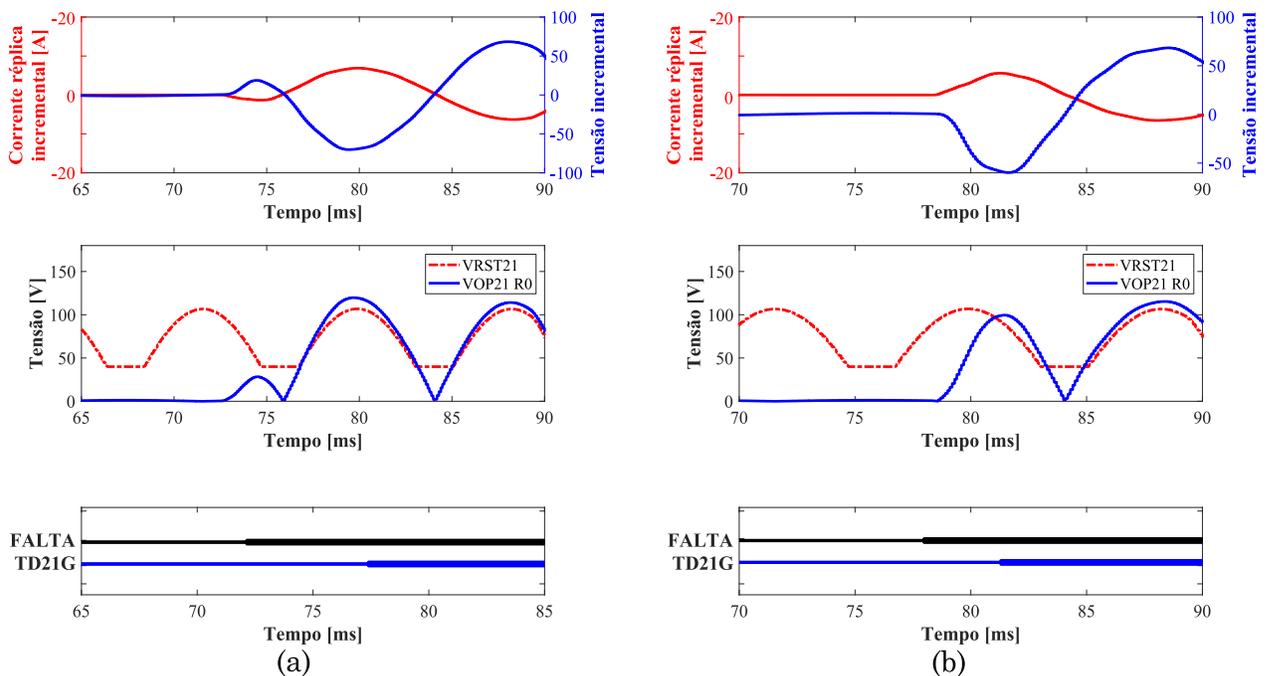


Figura 5.14: Caso 05 –Grandezas incrementais, sinais de restrição e operante e resposta do elemento TD21 para níveis de tensão (a) com um valor negativo e (b) com um ponto máximo

Na Figura 5.14 apresentam-se a tensão e a corrente de réplica incremental do *loop* envolvido na falta. Neste caso se vê que a corrente de réplica incremental começa com polaridade

negativa, mas troca a sua polaridade antes de atingir entrar numa resposta sustentada. Este comportamento não afeta na operação do elemento TD32, que opera de maneira confiável e rápida, mas afeta a velocidade do elemento TD21. A tensão de operação do elemento TD21 está próxima da tensão de restrição 2 ms após a falta, mas excede a tensão de restrição após 5 ms, quando a corrente de réplica incremental muda de polaridade e torna-se positiva. O caso ilustra como o ângulo de incidência da onda de tensão afeta a resposta do elemento TD21.

5.1.7. SIMULAÇÃO EM MASSA 02: INFLUÊNCIA DO PONTO NA ONDA DE TENSÃO DE FALTA NOS ELEMENTOS TD21 E TD32

Para poder avaliar o impacto do ponto na onda de tensão nos tempos de operação dos elementos de proteção TD21 e TD32, usa-se o sistema elétrico da Figura 5.1 com um SIR de 1. São realizadas extensivas simulações de falta monofásicas (AT, BT e CT) a 40% do comprimento da linha LT1 variando o nível da tensão do *loop* da fase envolvida na falta de -1 pu (pico negativo) a +1 pu (pico positivo) em incrementos de 0,2 pu. São registrados os tempos de operação para os elementos TD21 e TD32, como mostrado na Figura 5.15.

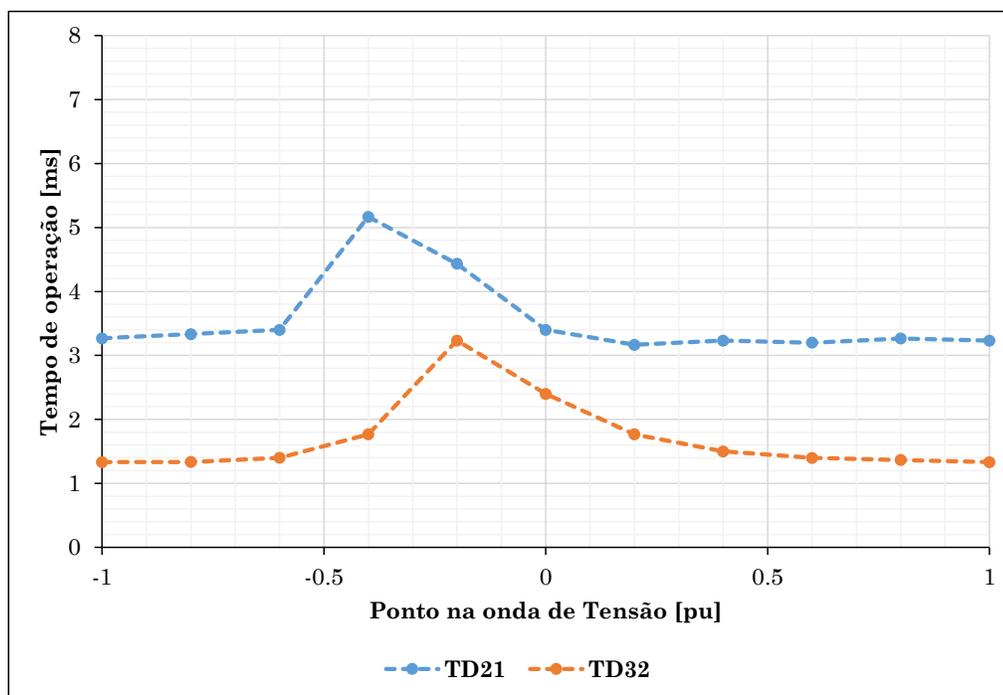


Figura 5.15: Efeito do ponto na onda de tensão nos tempos de operação dos elementos TD21 e TD32 para faltas monofásicas

Pode-se observar que a variação do ponto na onda causa um desvio nos tempos de operação dos elementos TD32 e TD21 de 1,5 ms e 3 ms, respectivamente. Os elementos respondem mais rápido para faltas perto do pico da tensão (1 pu). Isso ocorre porque o transitório é maior para ângulos próximos a 90° e -90° .

5.1.8. SIMULAÇÃO EM MASSA 03: IMPACTO DO SIR NOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO TD21 E TD32

Para se avaliar a influência da força dos sistemas terminais nos tempos de operação foram simulados os casos pontuais descritos a seguir. O objetivo é avaliar o impacto do SIR na resposta dos elementos TD21 e TD32. Ilustra-se a curva do tempo médio de operação para o mesmo sistema elétrico da Figura 5.1, mas com um SIR que varia entre 0,1 a 2 e com um alcance do elemento TD21 ajustado a 80% do comprimento da linha. Foram realizadas 405 simulações de faltas francas variando o tipo de falta e o instante de aplicação do defeito em relação à onda de tensão (cruzamento pelo zero e o valor pico). Em Figura 5.16 e Figura 5.17 mostram-se os tempos de operação médios dos elementos TD21 e TD32 obtidos, respectivamente.

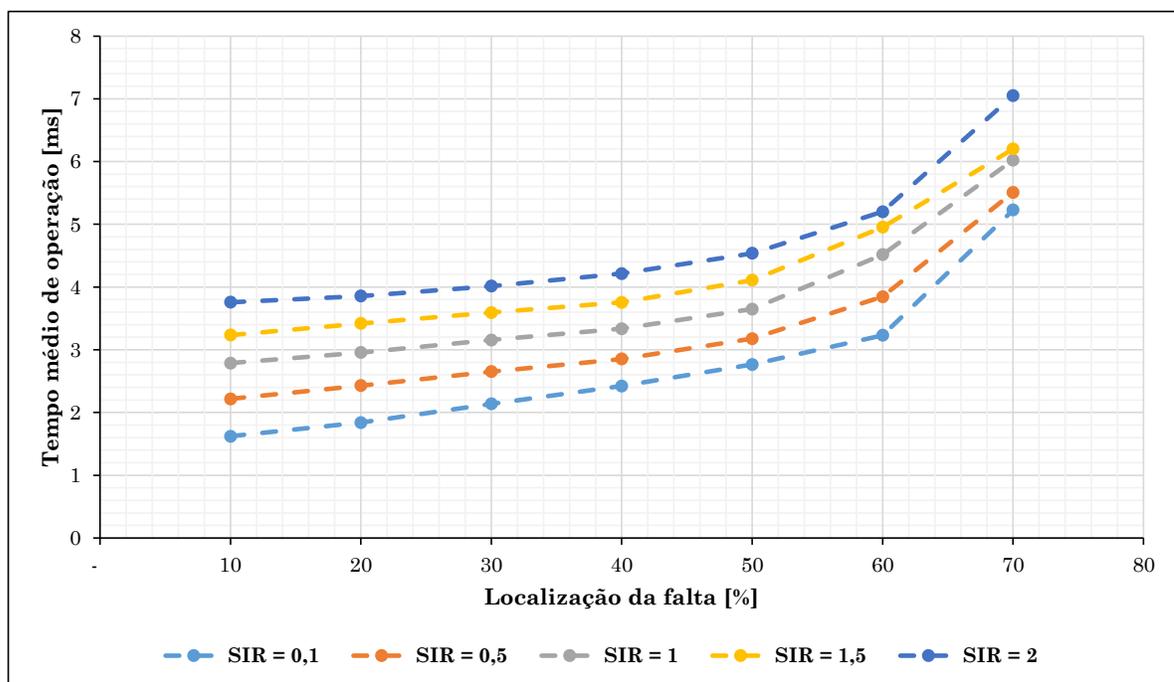


Figura 5.16: Curva dos tempos de operação médio do elemento TD21 em função da localização da falta para diferentes valores do SIR

Observa-se que o elemento de proteção TD21 opera em média abaixo de 3 ms para faltas mais próximas num sistema forte, opera entre 3 a 5 ms para faltas no meio da linha dependendo do nível de curto circuito, SIR, e opera aproximadamente acima dos 5 ms para faltas muito próximas ao limite do alcance para sistemas relativamente fracos. Para sistemas relativamente fracos o elemento TD21 não responde para faltas próximas do limite do alcance.

Por outro lado, o elemento TD32 apresenta tempos de operação em média de 2 ms. O elemento respondeu para todos os casos de falta simulados mostrando grande confiabilidade, segurança e velocidade.

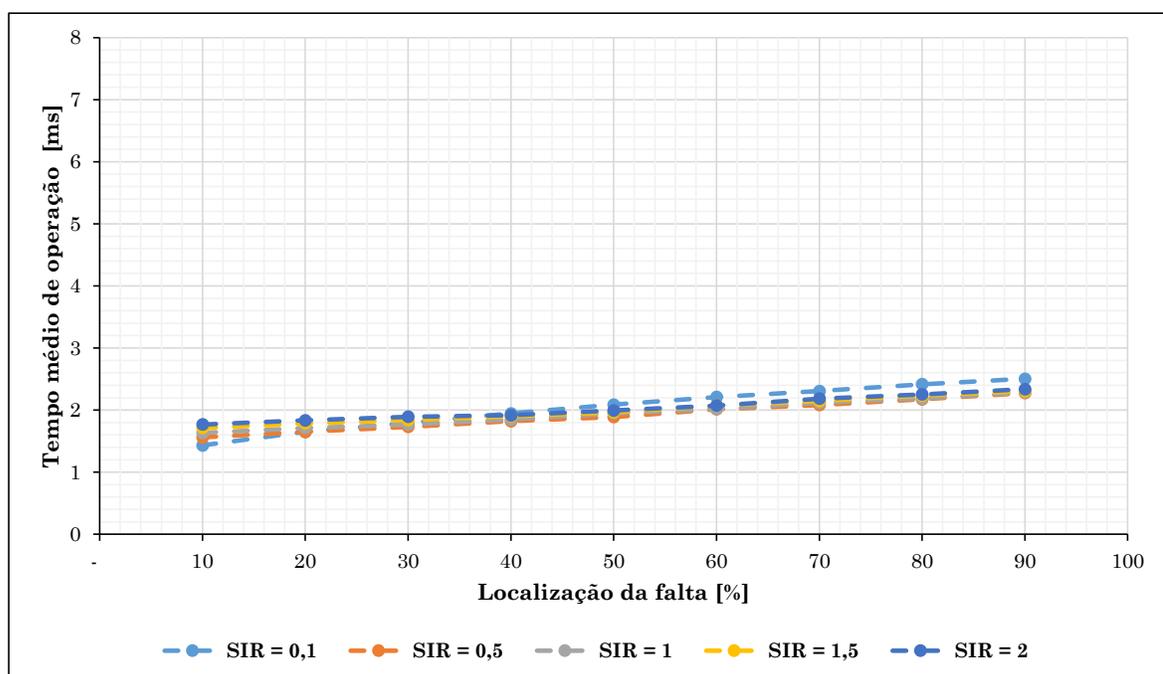


Figura 5.17: Curva dos tempos de operação médio do elemento TD32 em função da localização de falta para diferentes valores do SIR

5.2. DESEMPENHO DA PROTEÇÃO BASEADO EM ONDAS VIAJANTES (TWS)

Nesta seção apresentam-se os casos simulados de faltas variando a distância à falta, tipo de falta e ângulo de incidência da falta, com o objetivo de validar o desempenho da proteção direcional TW32 e a proteção diferencial TW87. Fazendo uso do sistema teste 02 da Figura 5.2 foram analisados vários casos pontuais de falta. O tempo de propagação da linha protegida é de 241,4 microssegundos, valor que foi calculado através de um teste de energização. Destaca-se

que os casos de falta não são avaliados para um ângulo de incidência próximo da passagem de tensão por zero, já que nestes casos a falta não seria detectável pelas funções de TW.

5.2.1. SIMULAÇÃO PONTUAL 06: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO AT NA LT1, NO PONTO L1F3 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 90°

No primeiro caso pontual simulou-se um curto-circuito monofásico AT franco ($R_f = 0 \Omega$), sendo aplicado no ponto máximo da onda de tensão da fase A (ângulo de incidência 90°) e localizado a 1/3 do comprimento da linha protegida do circuito duplo, LT1. Apresentam-se na Figura 5.18 os sinais por fase de tensão e corrente do lado secundário dos TPs e TCs nos terminais local e remoto; e também o sinal com a identificação do início da falta e as respostas do elemento direcional TW32 e do esquema TW87. O elemento direcional à frente TW32F e o esquema diferencial foram ativados como projetado para um curto-circuito interno imediatamente após a falta.

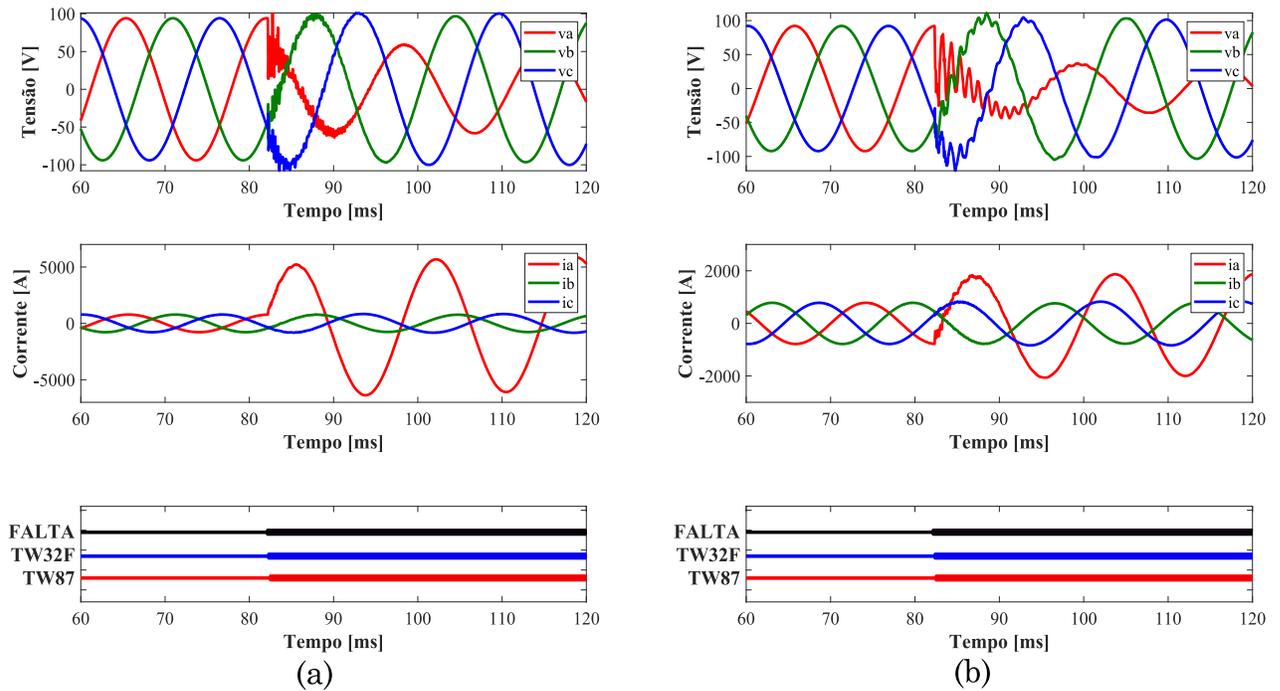


Figura 5.18: Caso 06 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto

De acordo com a Figura 5.19, as ondas viajantes (TW) de tensão e corrente da fase envolvidas na falta apresentam distintas polaridades, conforme o esperado para uma falta à frente.

Portanto, se espera que o torque acumulado do elemento direcional TW32 seja claramente positivo.

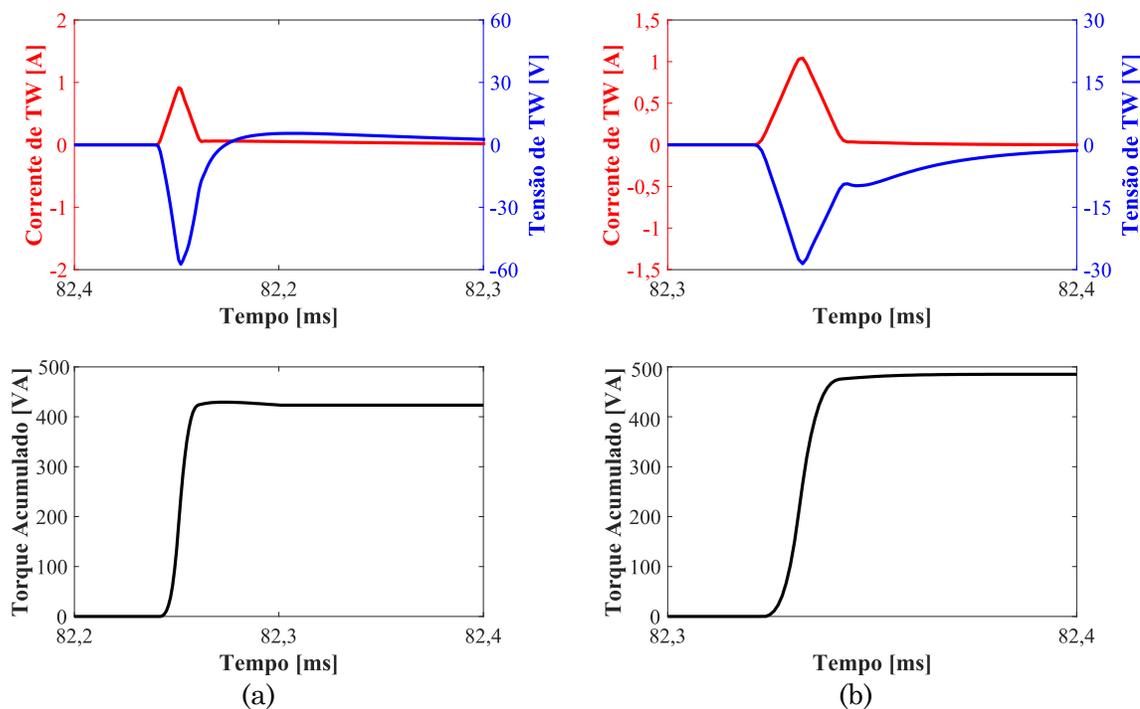


Figura 5.19: Caso 06 - Sinais de TWs de tensão e corrente da fase A e o torque acumulado do elemento TW32 (a) no terminal local e (b) remoto

Na Figura 5.20 ilustram-se as correntes de TWs do modo aéreo mais significativo para uma falta monofásica AT, nesse caso o modo aéreo alfa referido na fase A (i_{TW1A}) dos terminais local e remoto alinhados no tempo; e as correntes de operação e de restrição para o esquema diferencial TW87. A diferença do tempo de chegada das duas primeiras TWs de corrente nos terminais é menor do que o tempo de propagação da linha ($\tau = 241 \mu\text{s}$) e as TWs possuem as mesmas polaridades, o que indica que foram produzidas pelo defeito vem da linha protegida e entram pela não polaridade dos TCs. Verifica-se também, que a corrente de operação é consideravelmente maior do que a corrente de restrição, indicando um curto-circuito interno, mas mesmo assim ainda é necessário revisar outras condições de segurança.

Na Figura 5.21 são apresentadas as correntes de onda viajante por fase que podem fornecer a informação da localização do defeito através dos tempos de chegada das primeiras ondas viajantes nos terminais local e remoto. Foram computadas localizações de falta em pu com respeito ao terminal local: para fase A, 0,33 pu; para fase B, 0,324 pu e para fase C, 0,345 pu.

Esses valores mostram que o defeito ocorreu dentro da linha, pois se encontram dentro do intervalo de 0 a 1 pu (os valores são muito próximos do valor real aplicado).

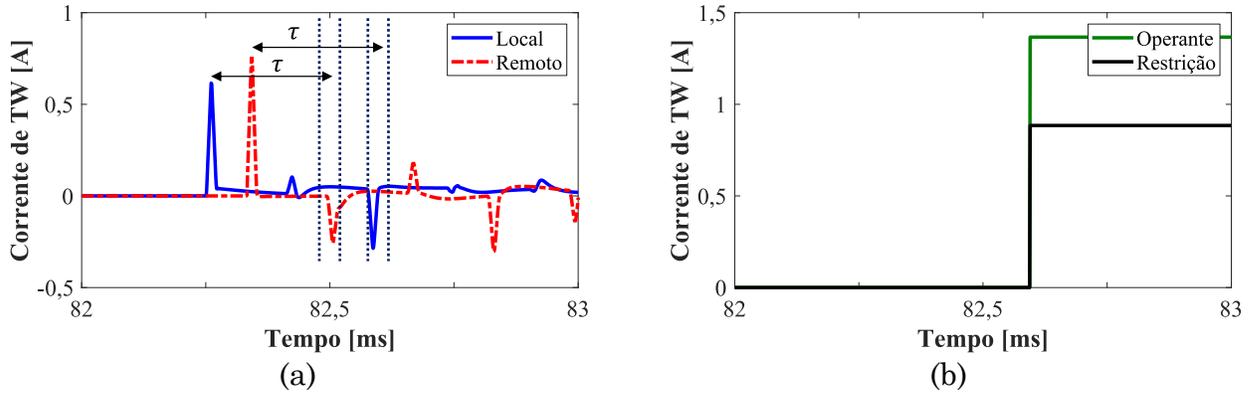


Figura 5.20: Caso 06 - (a) TW do modo alfa da corrente referida à fase A, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87.

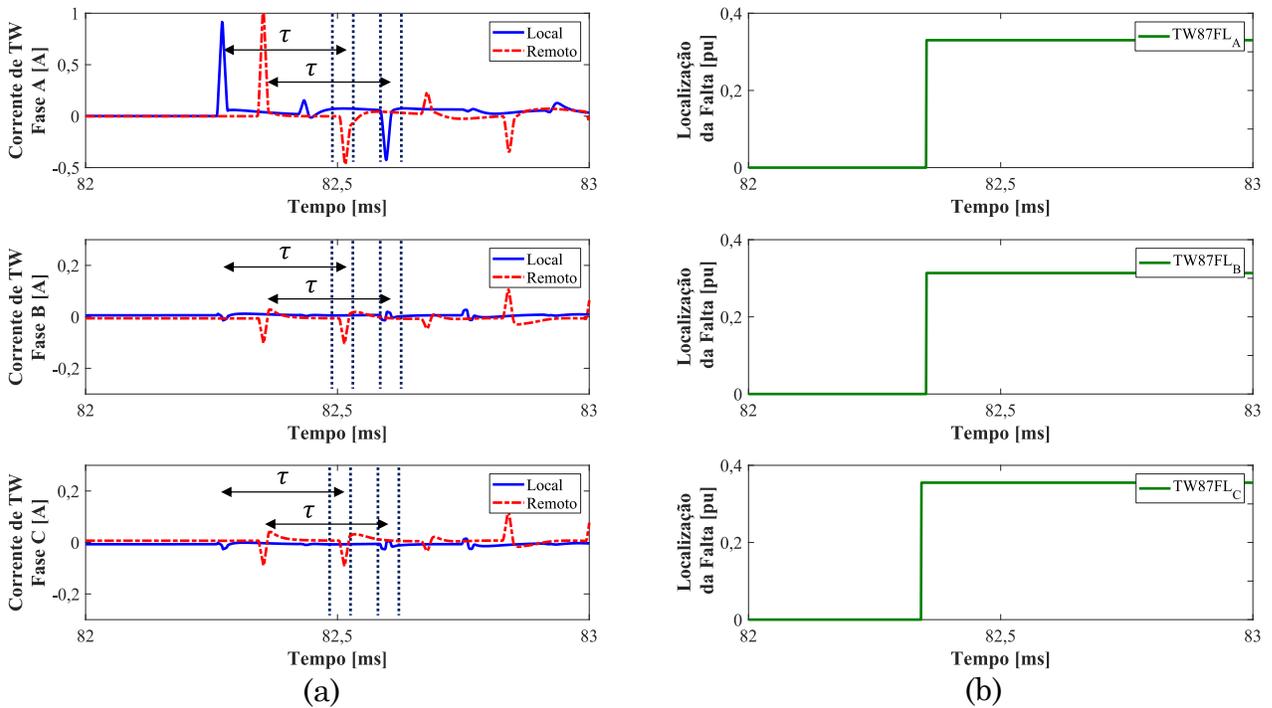


Figura 5.21: Caso 06: (a) TW de corrente por fase nos terminais local e remoto da LT e seus respectivos tempos de trânsito (b) localizações de falta (TW87FL) em pu.

Além das condições que já foram verificadas para um curto-circuito interno, mais uma condição de segurança deve ser confirmada e está relacionada com a tensão de polarização (VPOL) e a corrente de operação (i_{OP}) do modo aéreo mais significativo (modo alfa referido na fase A). É fácil deduzir a polaridade da tensão de polarização observando a Figura 5.22, já que o

modo alfa referido na fase A mantém a mesma polaridade da tensão pré-falta instantânea da fase A ($i_{TW0} = 0$) nos terminais local e remoto, que têm polaridade positiva. Portanto, a tensão pré-falta no ponto de defeito também deve ser positiva, já que o seu valor é calculado a partir do valor estimado da localização de falta e uma linha reta que une as tensões instantâneas local e remota tomadas imediatamente antes da falta.

Para melhor entendimento, de acordo com a Figura 5.22, a tensão de polarização e a corrente de operação da fase envolvida na falta possuem as mesmas polaridades, conforme o esperado para um curto-circuito interno.

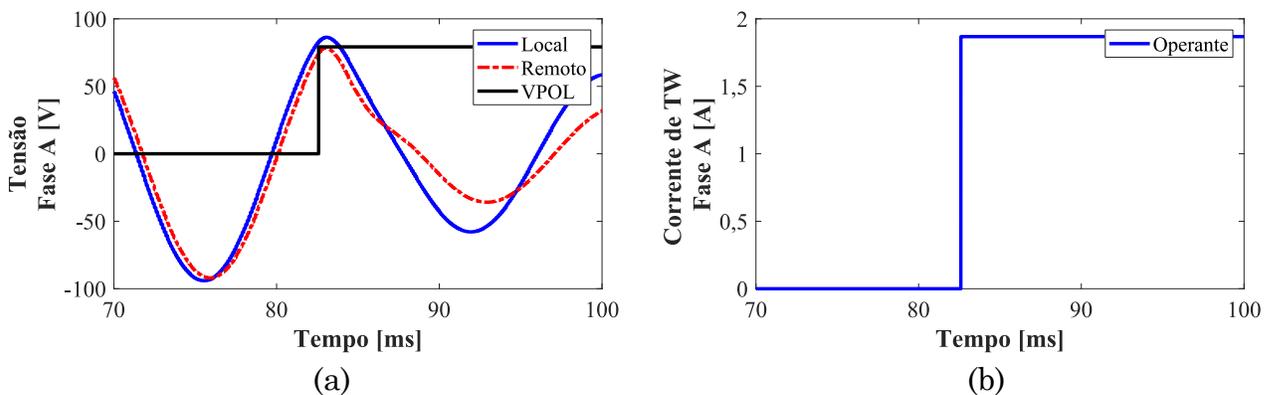


Figura 5.22: Caso 06 - (a) Tensão nos terminais local e remoto, tensão de polarização; e (b) correntes de operação da fase envolvida na falta.

5.2.2. SIMULAÇÃO PONTUAL 07: CURTO-CIRCUITO INTERNO BIFÁSICO BCT NA LT1, NO PONTO L1F3 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 60°

Nesse segundo caso pontual, simulou-se um curto-circuito bifásico para terra BCT com uma resistência de falta para terra de 10Ω , sendo aplicado um ângulo de incidência de 60° e o defeito está localizado a $1/3$ do comprimento da linha protegida do circuito duplo, LT1. Na Figura 5.23 apresentam-se os sinais por fase de tensão e corrente do lado secundário dos TPs e TCs nos terminais local e remoto. Também é ilustrado o início da falta e as respostas do elemento direcional TW32 e do esquema diferencial TW87. O elemento direcional à frente TW32F e o esquema diferencial foram ativados como projetado para um curto-circuito interno imediatamente após a falta.

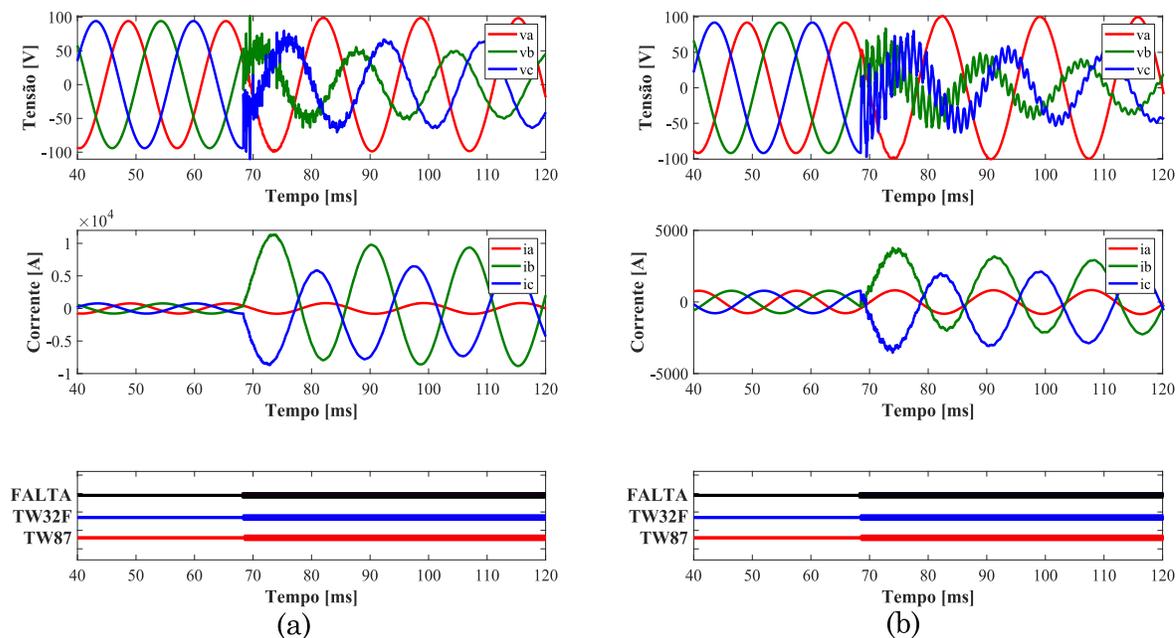


Figura 5.23: Caso 07 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto

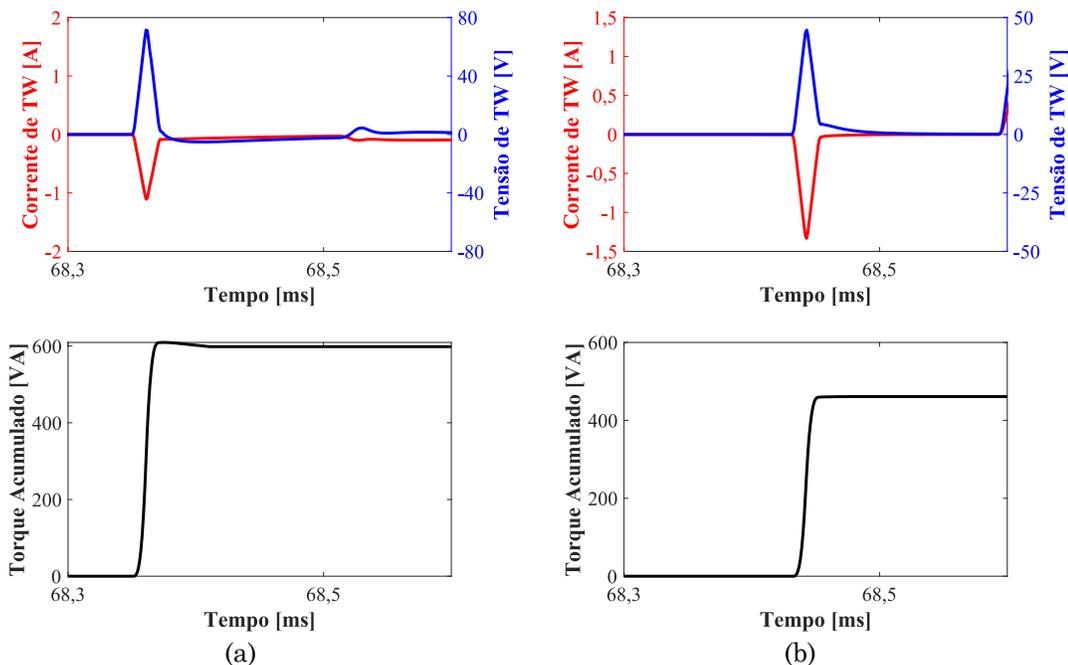


Figura 5.24: Caso 07 - Sinais de TWs de tensão e corrente da fase C e o torque acumulado do elemento TW32 (a) no terminal local e (b) remoto

De acordo com a Figura 5.24, as TWs de tensão e corrente de uma das fases envolvida na falta, nesse caso a fase C, apresentam distintas polaridades conforme o esperado em uma falta à frente. Portanto, se espera que o torque acumulado do elemento direcional TW32 seja claramente

positivo. Na Figura 5.25 ilustram-se as correntes de TWs do modo aéreo mais significativo para uma falta entre fases B e C dos terminais local e remoto alinhados no tempo, nesse caso o modo aéreo beta referido na fase A (i_{TW2A}); e as correntes de operação e de restrição para o esquema diferencial TW87. A diferença de tempo de chegada das duas primeiras TWs de corrente nos terminais é menor do que o tempo de propagação da linha ($\tau = 241 \mu\text{s}$), além de ambas as TWs apresentarem as mesmas polaridades. Verifica-se também que a corrente de operação está consideravelmente acima da corrente de restrição, indicando um curto-circuito interno.

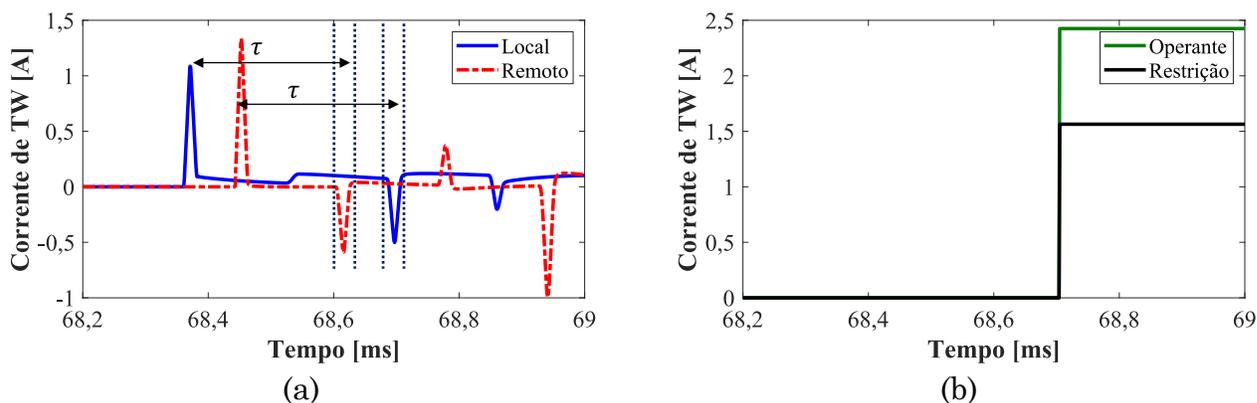


Figura 5.25: Caso 07 - (a) TW de corrente, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87

Foram computadas as localizações de falta por fase em pu com respeito ao terminal local: para fase A, 0,3134 pu; para fase B e C, 0,3302 pu. Esses valores mostram que o defeito ocorreu dentro da linha, pois se encontram dentro do intervalo de 0 a 1 pu. Além disso, os valores são muito próximos do valor real aplicado. Por outro lado, também foi calculada a tensão de polarização para o modo aéreo beta, o que resultou 37,72 V com polaridade positiva. Isto coincide com a polaridade da corrente de operação, 2,32 A. Portanto, o esquema diferencial TW87 operou confiavelmente.

5.2.3. SIMULAÇÃO PONTUAL 08: CURTO-CIRCUITO EXTERNO MONOFÁSICO BT NA LT3, NO PONTO L4F5 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 240°

Nesse caso pontual, simulou-se um curto-circuito monofásico BT com uma resistência de falta para terra de 5Ω , sendo aplicado com um ângulo de incidência de 240° e localizado a 2/3 do comprimento da linha a jusante do circuito duplo, LT3.

Na Figura 5.26 apresentam-se os sinais por fase de tensão e de corrente no secundário dos TPs e TCs nos terminais local e remoto, assim como o início da falta e as respostas do elemento direcional TW32 e do esquema diferencial TW87. No terminal local e remoto foram ativados os elementos direcionais à frente TW32F e reverso TW32R, respectivamente. O esquema diferencial TW87 não operou, conforme o esperado, para um curto-circuito externo.

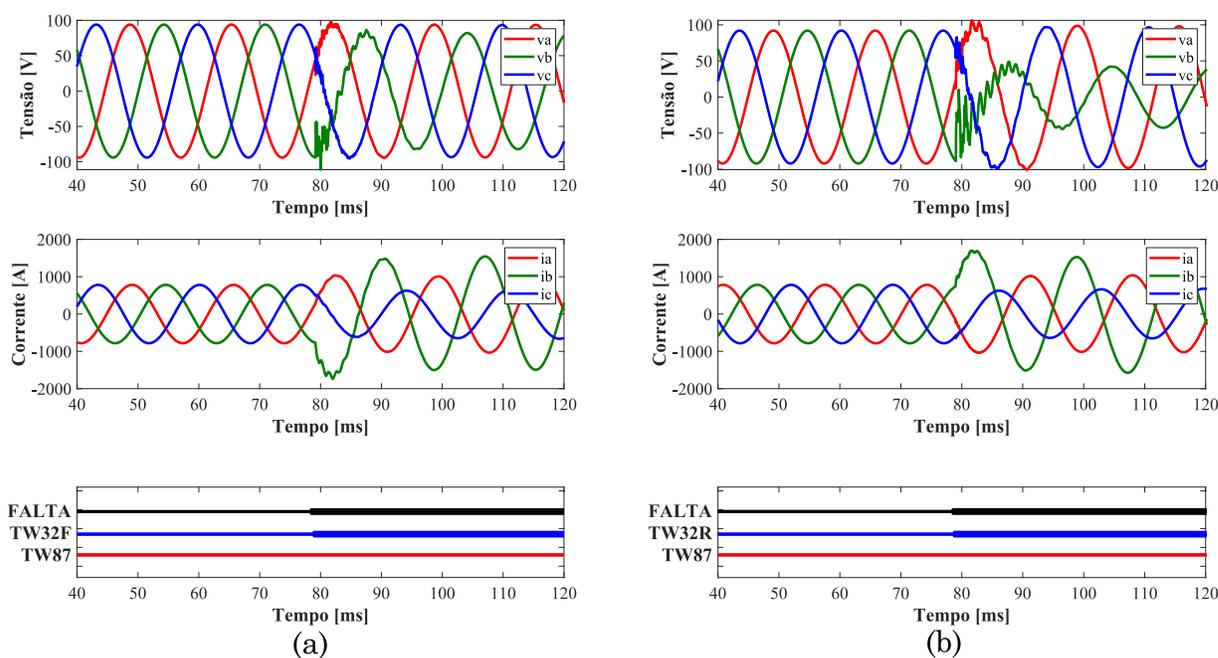


Figura 5.26: Caso 08 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto

De acordo com a Figura 5.27, no terminal local as ondas viajantes (TWs) de tensão e de corrente da fase envolvida na falta, nesse caso a fase B, apresentam distintas polaridades, isso porque o defeito com respeito ao relé local foi à frente. Portanto, se espera que o torque acumulado do elemento direcional TW32 desse terminal seja claramente positivo. Caso contrário ocorre no terminal remoto, já que as TWs de tensão e corrente da fase envolvida na falta apresentam as mesmas polaridades, indicando que a falta foi reversa com respeito ao relé remoto, portanto, seu torque acumulado é negativo.

De acordo com a Figura 5.28, as duas primeiras TWs dos terminais remoto e local apresentam uma diferença de tempo de chegada igual ao tempo de propagação da linha ($\tau = 241 \mu\text{s}$), além de terem polaridades distintas, o que indica que a TW entra pela polaridade de um TC e sai pela não polaridade do outro TC, característica de um curto-circuito externo.

Também verifica-se que a corrente de operação do esquema diferencial TW87 é menor do que a corrente de restrição.

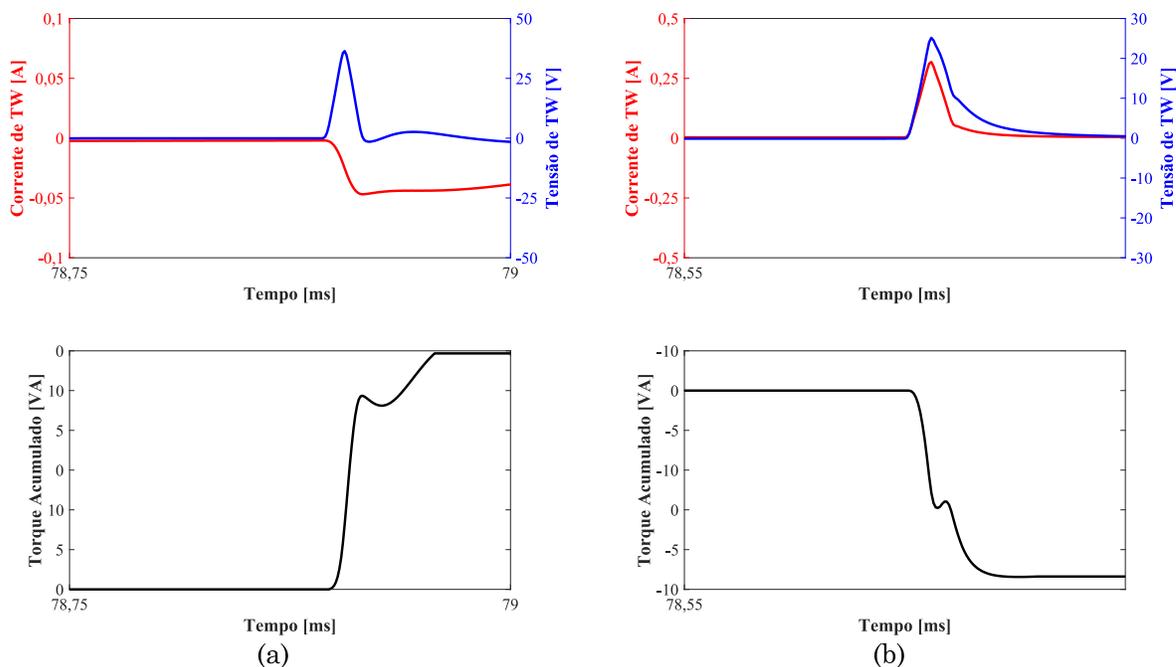


Figura 5.27: Caso 08 - Sinais de TWs de tensão e corrente da fase B e o torque do elemento TW32 (a) no terminal local e (b) remoto

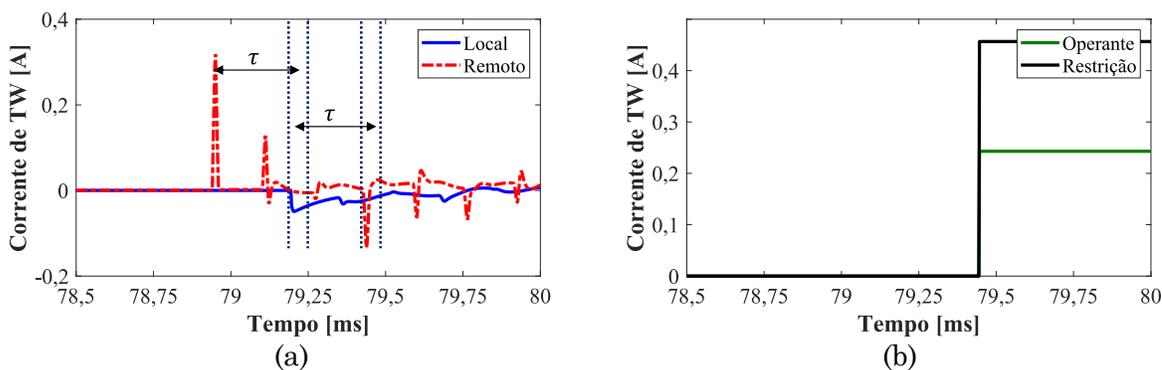


Figura 5.28: Caso 08 - (a) TW de corrente, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87

Na Figura 5.29 são apresentadas as TWs das correntes por fase, as quais fornecem a informação da localização do defeito através da análise dos tempos de chegada das primeiras ondas viajantes nos terminais local e remoto. Foram calculados os locais de falha em pu com respeito ao terminal local que são ligeiramente maiores do que 1 pu, com valores de 1,028 pu nas fases A e C e 1,026 pu na fase B, indicando que o defeito foi aplicado externamente.

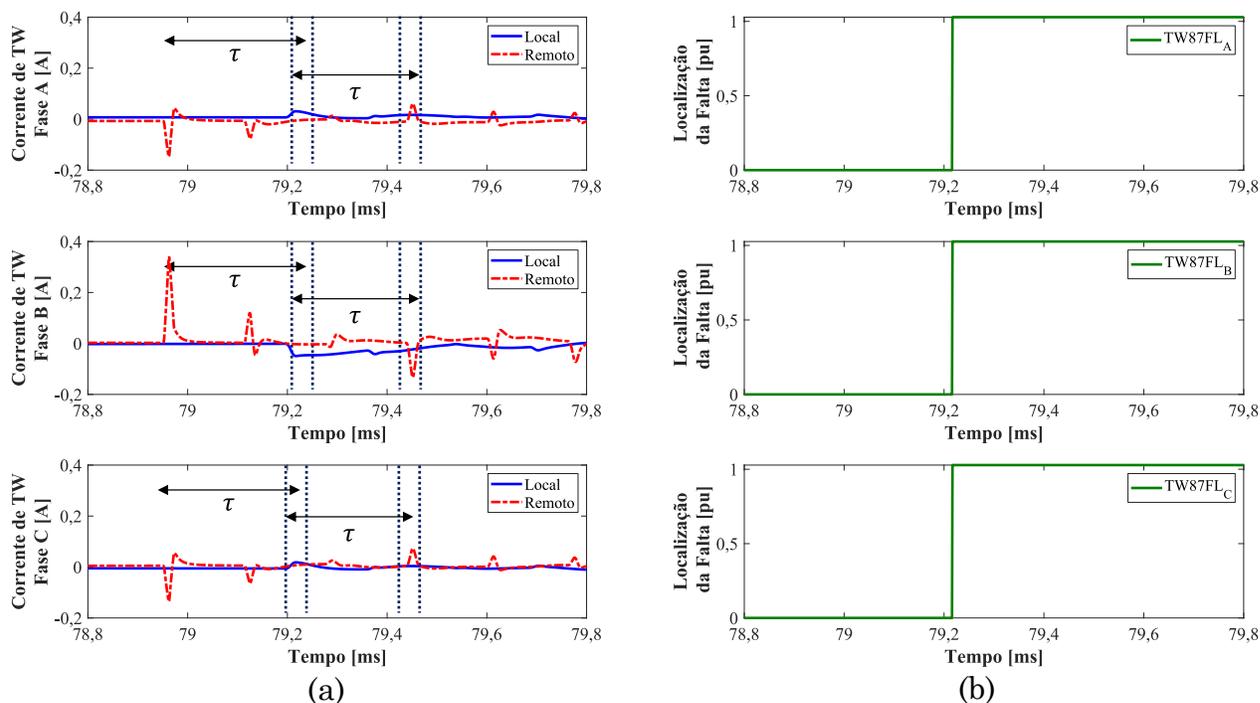


Figura 5.29: Caso 08: (a) TW da corrente por fase nos terminais local e remoto da LT e (b) localização de falta (TW87FL) em pu.

Além disto, também foi obtida a tensão de polarização para o modo aéreo alfa referido para a fase B (VOP1B), que é o modo aéreo mais significativo. O resultado foi $-60,72$ V (polaridade negativa), e a polaridade da corrente de operação do mesmo modo aéreo é positiva, o que permite concluir que o curto-circuito é externo, conforme o esperado pela função diferencial TW87, o que atesta a sua segurança.

5.2.4. SIMULAÇÃO PONTUAL 09: CURTO-CIRCUITO EXTERNO BIFÁSICO CA NA LT2, NO PONTO L2F5 COM ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE 120°

Nesse caso pontual simulou-se um curto-circuito bifásico CA com uma resistência de falta entre fases de 10Ω , sendo aplicado com um ângulo de incidência de 120° e localizado a $2/3$ do comprimento da linha adjacente do circuito duplo, LT2.

Na Figura 5.30 apresentam-se os sinais por fase de tensão e corrente do lado secundário dos TPs e TCs nos terminais local e remoto. Também é ilustrado o início da falta e as respostas do elemento direcional TW32 e do esquema TW87. No terminal local e remoto foram ativados seus elementos direcionais reversos TW32R. O esquema diferencial TW87 não operou, conforme o esperado para um curto-circuito externo.

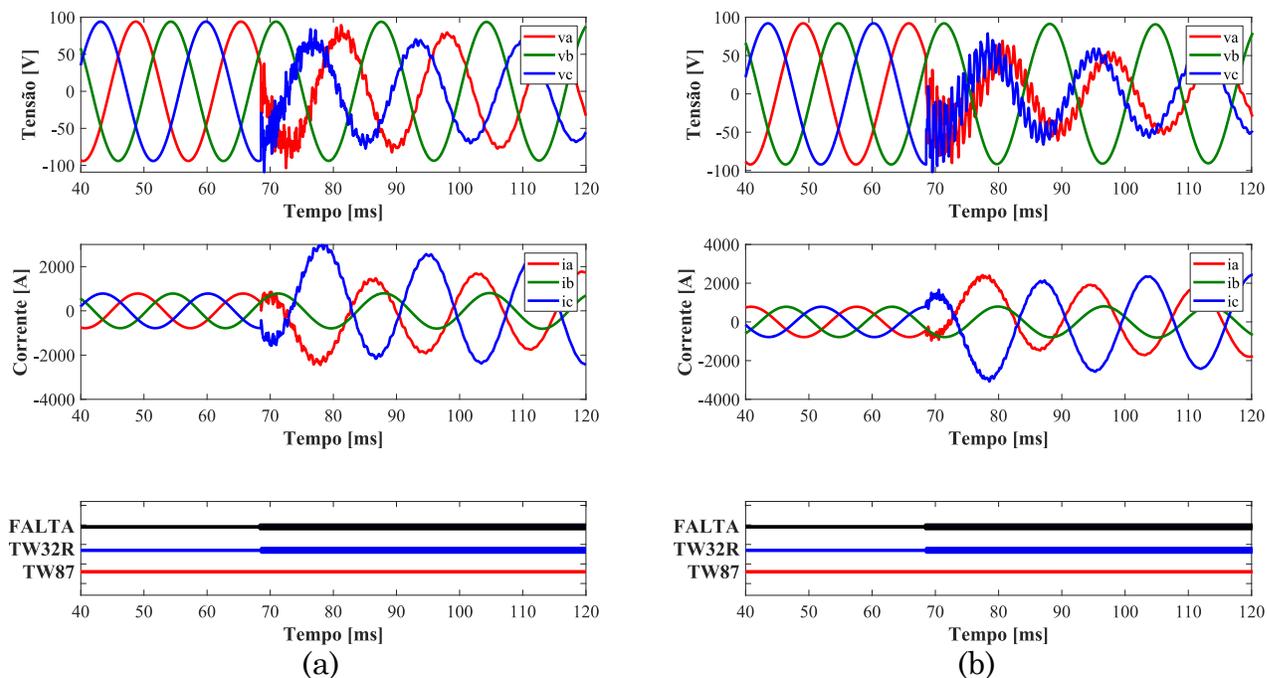


Figura 5.30: Caso 09 - Sinais por fase de tensões, correntes e resposta dos elementos TW32 e TW87 (a) no terminal local e (b) remoto

Na Figura 5.31 apresenta-se a diferença do tempo da chegada das duas primeiras TWs de corrente do modo aéreo mais significativo para uma falta entre fases C e A, nesse caso o modo aéreo beta referido na fase B (i_{TW2B}). Ele é menor do que o tempo de propagação da linha ($\tau = 241 \mu\text{s}$), além disso, as TWs possuem a mesma polaridade, o que indica que as ondas entram pelas polaridades dos seus respectivos TCs.

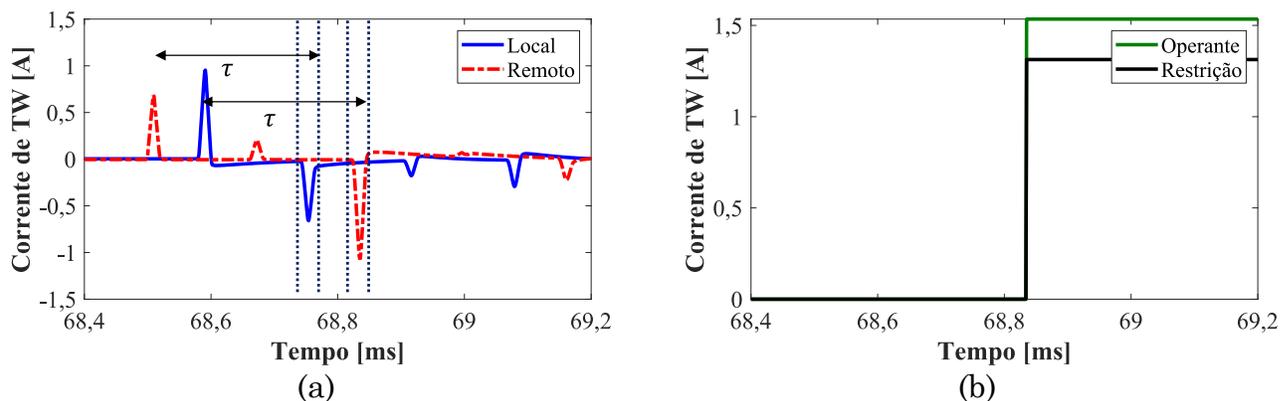


Figura 5.31: Caso 09 - (a) TWs de corrente, (b) corrente de operação e de restrição do modo aéreo mais significativo do esquema diferencial TW87

A corrente de operação é maior do que a corrente de restrição. Ademais, o esquema diferencial calcula a localização da falta aproximadamente em 0,6698 pu na fase C e A (valor entre 0 pu e 1 pu). Portanto, o curto-circuito parece ser interno.

Mesmo assim, o esquema diferencial TW87 inspeciona a polaridade da tensão de polarização (VPOL) com respeito à polaridade da corrente de operação (i_{OP}). Na Figura 5.32 são apresentadas as tensões nos terminais local e remoto das fases envolvidas no defeito e as polaridades das tensões pré-falta instantâneas das fases C e A são negativo e positivo, respectivamente. Portanto, no cálculo das tensões de polarização considerando o valor estimado da localização da falta (0,6698 pu) são obtidos valores negativo e positivo, respectivamente também. Essas polaridades são distintas das encontradas nas suas correntes de operação, portanto, o esquema diferencial não atua, conforme o esperado.

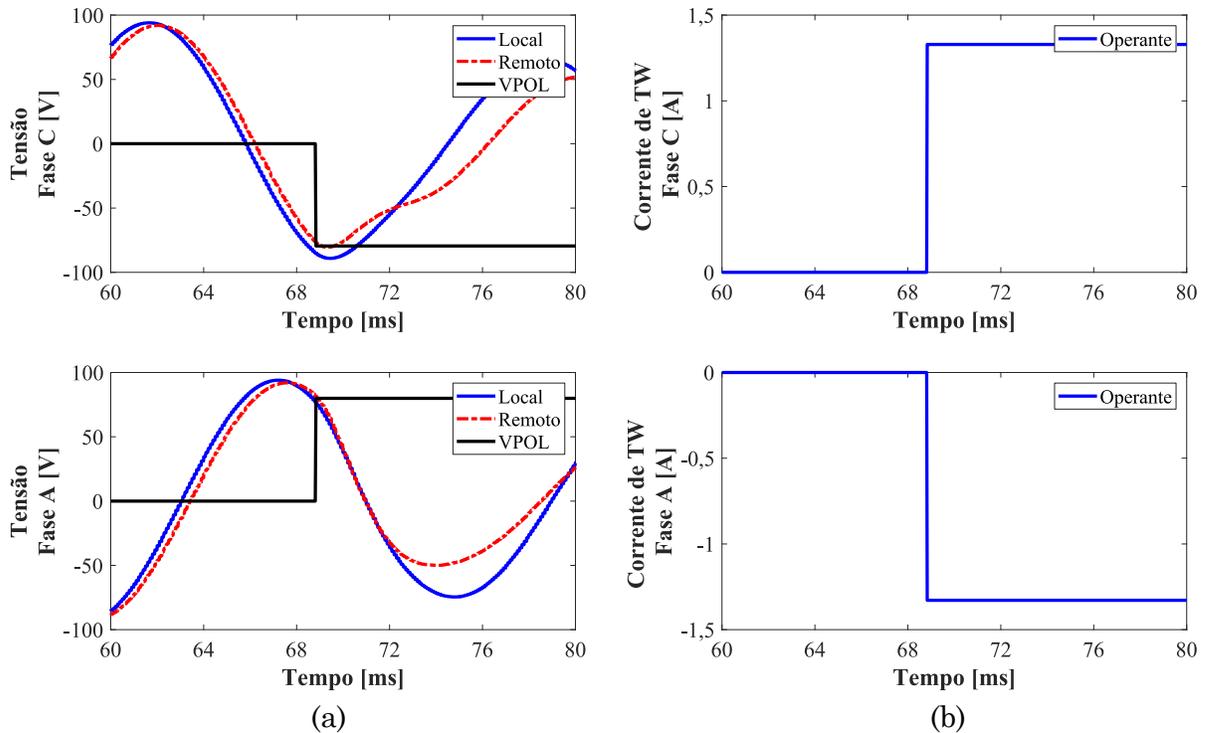


Figura 5.32: Caso 09 - (a) Tensões nos terminais local e remoto, tensão de polarização; e (b) correntes de operação das fases envolvidas na falta.

5.3. DESEMPENHO DO ESQUEMA DE DISPARO

Após o estudo do desempenho das proteções baseadas na teoria de grandezas incrementais (TD) e ondas viajantes (TW), implementou-se uma lógica de disparo que combina as duas

técnicas para proporcionar operação mais rápida e segura. Fazendo uso do sistema teste da Figura 5.1 são realizadas algumas simulações pontuais e simulações em massa variando as condições do defeito e do sistema elétrico (ver Tabela 5.5), com a intenção de verificar o desempenho da modelagem do esquema de disparo.

Tabela 5.5: Casos de Falta simulados para testar o Desempenho do Esquema de Proteção (TD e TW)

Tipo	CASO
10.	Curto-circuito Interno Monofásico CT na LT1, Variando o Ângulo de Incidência no Ponto 05.
Pontual	11. Curto-circuito Interno Monofásico BT na LT1, com Efeito do TPC no Ponto N02
	12. Curto-circuito Interno Monofásico AT na LT1, Variando o Modelo de LT
Massa	04. Desempenho do Esquema de Proteção

5.3.1. SIMULAÇÃO PONTUAL 10: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO CT NA LT1, VARIANDO O ÂNGULO DE INCIDÊNCIA NO PONTO 05

Neste primeiro caso pontual de falta que considera um esquema de disparo com a combinação das técnicas baseadas em grandezas incrementais e nas ondas viajantes, simularam-se dois curto-circuito monofásicos CT com uma resistência de falta de 10Ω , variando o ângulo de incidência da falta com um valor nulo e pico da tensão (0° e 90°), sendo aplicados no ponto 05 a 110 km do terminal local na linha LT1 do sistema da Figura 5.1. A LT é conectada a um sistema relativamente forte com um SIR de 0,55 nos terminais local e remoto.

Ilustram-se na Figura 5.33 os sinais por fase de tensão e corrente, assim como, as saídas digitais dos elementos de proteção de onda viajante e grandezas incrementais (TD32F, TD21G, TW32F e TW87) e dos elementos supervisores de sobrecorrente (OCTP, OC21 e OC87), para um ângulo de incidência de 90° (valor pico da tensão) e 0° (valor nulo da tensão).

Na simulação da Figura 5.33(a) apresentam-se que as funções de proteção de onda viajante, TW32F e TW87, atuaram confiavelmente com tempos de 0,5 ms e 1,2 ms, respectivamente. O elemento TW32 atua imediatamente após ser computado e verificado que a energia acumulada durante um período de $100 \mu\text{s}$ das primeiras TW de tensão e corrente apresente polaridade positiva, tempo suficiente para obter um sinal confiável. Após sua operação ele se mantém ativado por um período mínimo de 3 ms, sendo que esse tempo é necessário para contemplar sua

operação dentro do esquema POTT em conjunto com o elemento TD32. Por outro lado, a função TW87, após ter validada as condições de segurança necessárias para sua operação que foram descritas na seção anterior, reafirma o bit TW87PKP indicando que existe um distúrbio na linha protegida. Esse bit permanece ativo por um quarto de ciclo assegurando que o elemento supervisor de sobrecorrente OC87 seja reafirmado também, e assim o bit TW87 seja ativado. As funções de proteção baseadas em grandezas incrementais, TD32F e TD21G, atuaram confiavelmente com tempos de 1,5 ms e 3,5 ms, respectivamente. Sua operação é supervisionada pelos elementos de sobrecorrente OCTP e OC21, respectivamente. Conforme apresentado na Figura 5.33, os elementos de sobrecorrente não comprometem a operação confiável de nenhum dos elementos.

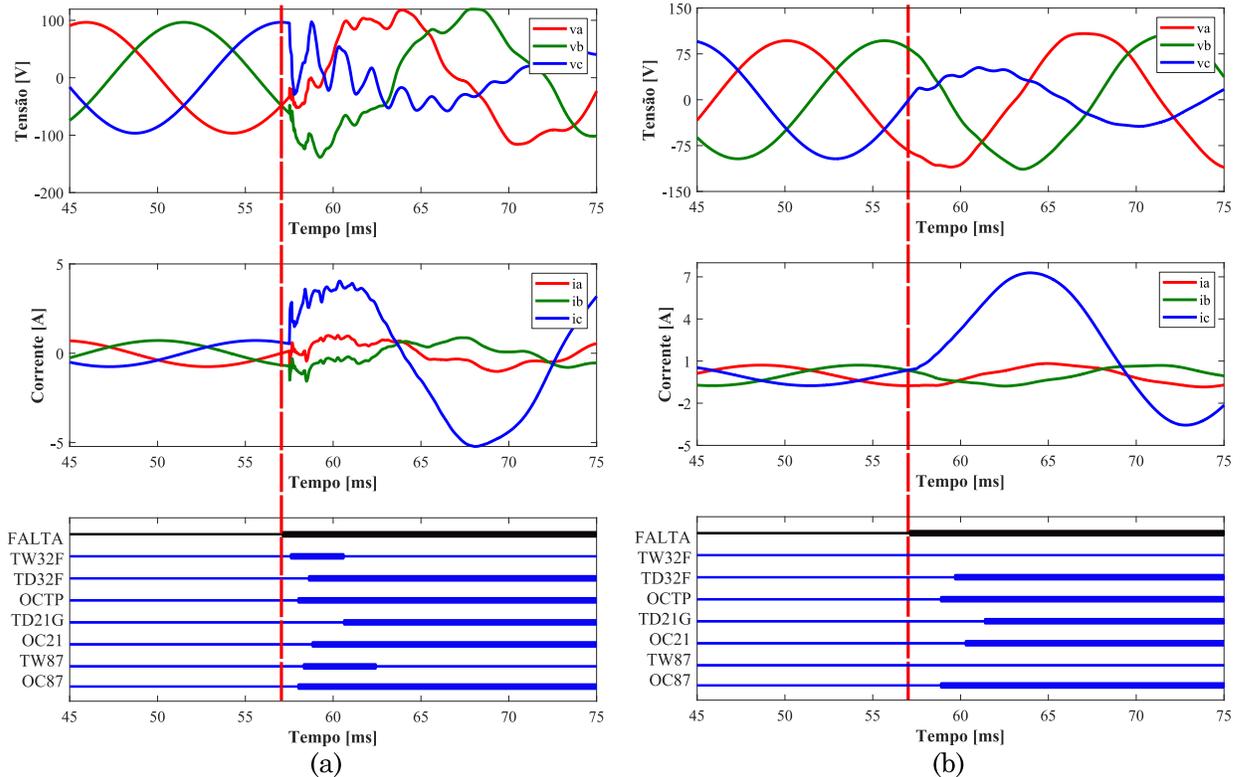


Figura 5.33: Caso 10 - Sinais por fase de tensões, correntes e saídas digitais para um ângulo de incidência de (a) 90° e (b) 0°.

Na simulação da Figura 5.33(b), observa-se que as funções de proteção baseadas em ondas viajantes (TW), TW32F e TW87, não operam para ângulo de incidência de 0° pelo fato de que não existe um transitório induzido pela falta que gere TW suficientes para sensibilizar essas proteções. Mesmo assim, os elementos baseados em grandezas incrementais asseguram um trip

durante estas condições, TD32F e TD21G, e atuaram confiavelmente com tempos de 2,6 ms e 4,3 ms, respectivamente.

Na Figura 5.34 apresentam-se as saídas digitais e o trip do esquema de proteção considerando TPC e TP ideais. Ilustra-se o bit PTC que representa o sinal permissivo na fase C no terminal local e que é usado no esquema POTT para afirmar em conjunto com o bit direcional à frente TD32F - o bit RXPRM (trip independente do esquema POTT), e que a sua vez através de uma lógica OR com a saída por fase dos sinais recebidos do esquema DTT (DTRXA, DTRXB e DTRXC) ativa o bit COMPRM. O trip definitivo (TRIP) é comandado por uma lógica OR dos bits independentes dos esquemas assistidos por comunicação POTT e DTT, assim como, um trip incondicional que combina os elementos TD21G, TW87 e TD21P, como foi descrito na seção da Implementação do Esquema de Disparo. Pode-se observar que no caso de falta com ângulo de incidência de 90° (valor pico da tensão da fase A) o trip é dado pela função diferencial de TW da fase C (TW87C), e apresentou um tempo de operação de 1,2 ms. No caso de falta com ângulo de incidência de 0° (valor nulo da tensão da fase A) o trip é dado pela afirmação do elemento direcional à frente TD32FC remoto mais o tempo de demora do bit permissivo PTC no terminal local, resultando em um tempo de operação de 3,7 ms.

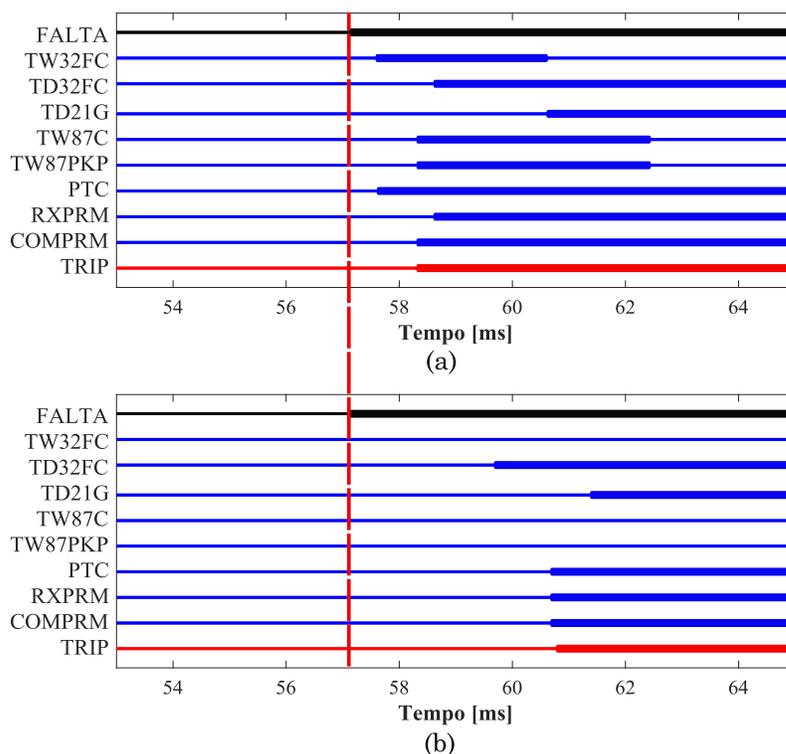


Figura 5.34: Caso 10 - Saídas digitais e o disparo para um ângulo de incidência de 90° (a) e 0° (b)

Portanto, conclui-se que o esquema de proteção sempre assegura um trip, independente do ângulo de incidência. Porém sua operação se torna mais lenta para ângulos de incidência de 0° (ou próximos), neste caso particular com uma diferença em tempos de operação de 2,5 ms. De fato, a maioria dos defeitos que acontecem no sistema de potência tem uma maior probabilidade de ocorrer para ângulos que sensibilizam a proteção (SCHWEITZER et al., 2016b).

5.3.2. SIMULAÇÃO PONTUAL 11: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO BT NA LT1, COM EFEITO DO TPC NO PONTO N02

Neste caso pontual se avaliou o uso de um Transformador Potencial Capacitivo (TPC) em comparação de um Transformador de Potencial (TP) ideal. O circuito elétrico do TPC encontra-se descrito no Apêndice A. Simularam-se dois curto-circuito monofásicos BT francos ($R_f = 0 \Omega$), com o modelo real e ideal, sendo aplicado no ponto 02 a 44 km do terminal local na linha LT1 do sistema da Figura 5.1, no máximo da tensão (90°). A LT é conectada a um sistema relativamente forte com um SIR de 0,55 nos terminais local e remoto.

De fato, o comportamento transitório do TPC distorce e atenua a forma de onda de tensão, não deixando passar os componentes de alta frequência no lado secundário, conforme a Figura 5.35. Porém, a reprodução desses componentes pode ser obtida se for considerado um modelo de TPC mais sofisticado que inclua as capacitâncias, embora exija um conhecimento de dados que não são facilmente obtidos junto aos fabricantes desses equipamentos e que depende das características de projeto próprio de cada TPC (KEZUNOVIC; KOJOVIC, 1992).

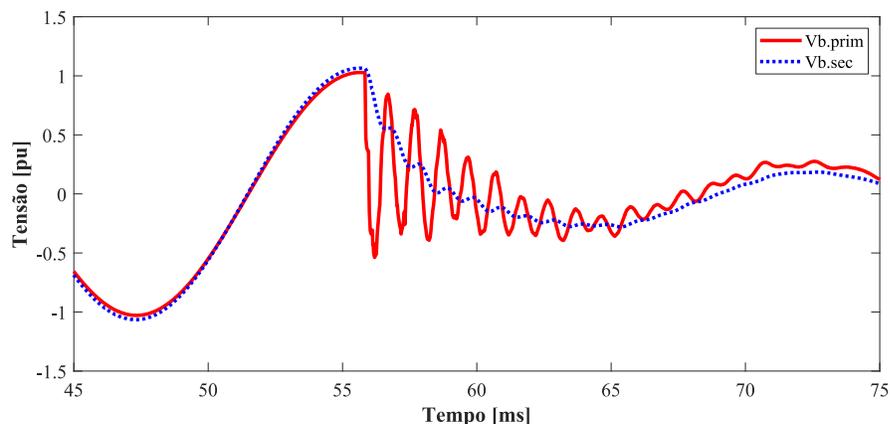


Figura 5.35: Forma de onda de tensão em pu do lado primário e secundário considerando um TPC.

Na Figura 5.36 são ilustrados os sinais de onda viajante de tensão e de corrente por fase, assim como, as saídas digitais das funções de proteção de TW, TW32F e TW87. No caso de falta simulado considerando o TP ideal, a TW de tensão é reproduzida no lado secundário com uma magnitude suficiente para sensibilizar a proteção direcional à frente TW32F. Em contrapartida, no caso de falta simulado considerando o TPC, a tensão de TW no lado secundário é gravemente atenuada, de modo que o elemento direcional TW32F não atua. Mesmo assim, a função diferencial TW87 assegura uma atuação confiável nos dois casos de falta simulados com um tempo de operação de 1,4 ms.

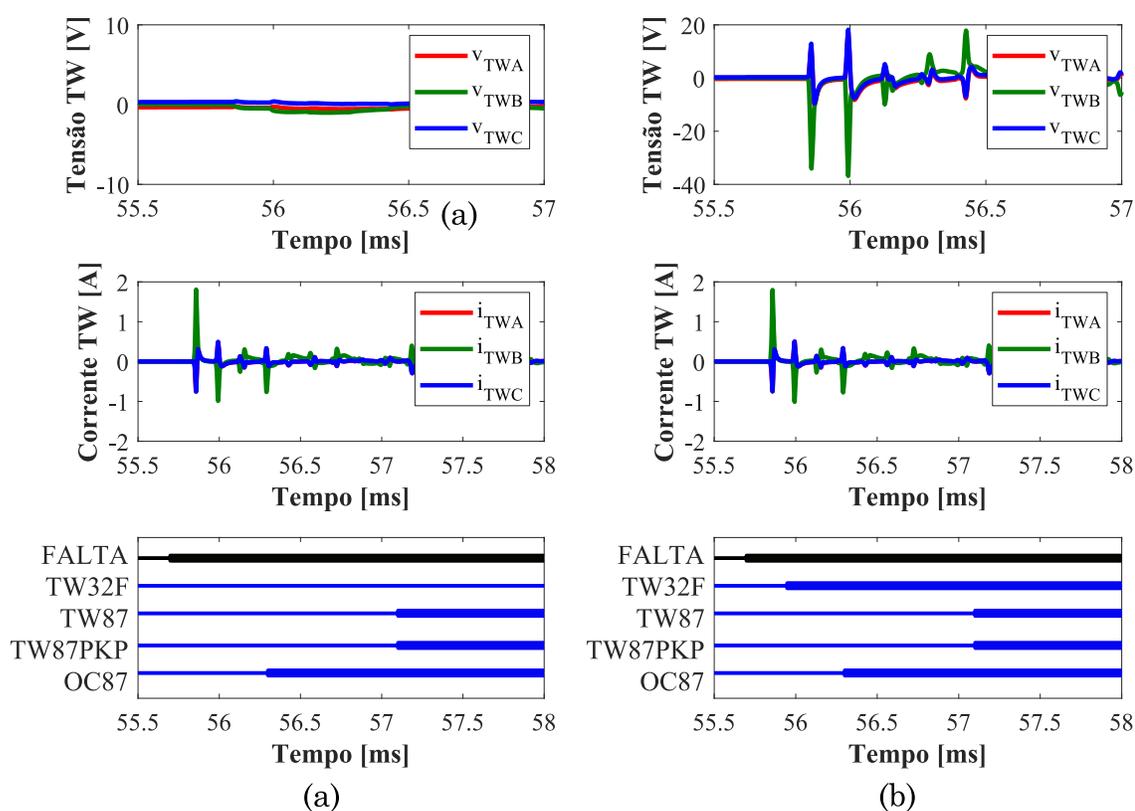


Figura 5.36: Caso 11 - Sinais de onda viajante (TW) de tensão e corrente, e o disparo das funções de proteção TW considerando um (a) TPC e um (b) TP ideal.

Ilustra-se na Figura 5.37 os sinais por fase da tensão e corrente, assim como, as saídas digitais dos elementos de proteção de onda viajante e grandezas incrementais (TD32F, TD21G, TW32F e TW87) e dos elementos supervisores de sobrecorrente (OCTP, OC21 e OC87), considerando um modelo de TPC e de TP ideal.

Conforme já foi discutido no caso de falta simulado com o TPC, o elemento direcional à frente TW32F não opera, já que ele precisa do sinal de TW de tensão na sua operação, sendo a

função diferencial TW87 a única a operar das funções baseadas em TW. Por outro lado, nos elementos baseados em grandezas incrementais se observou que os tempos de operação são ligeiramente menores considerando o TP ideal. Os elementos TD32F e TD21G atuaram com tempos de operação de 1,6 ms e 3 ms com TPC; e 1,3 ms e 2,5 ms com TP ideal. Isto ocorre porque esses elementos fazem uso da tensão incremental, por exemplo no caso do elemento TD21 a tensão de operação (V_{21OP}) evolui com maior magnitude devido à menor atenuação usando um TP ideal, conseguindo um tempo menor quando é comparado usando um TPC. Assim também se conclui, que os elementos supervisores de sobrecorrente não comprometem a operação confiável de nenhum destes elementos.

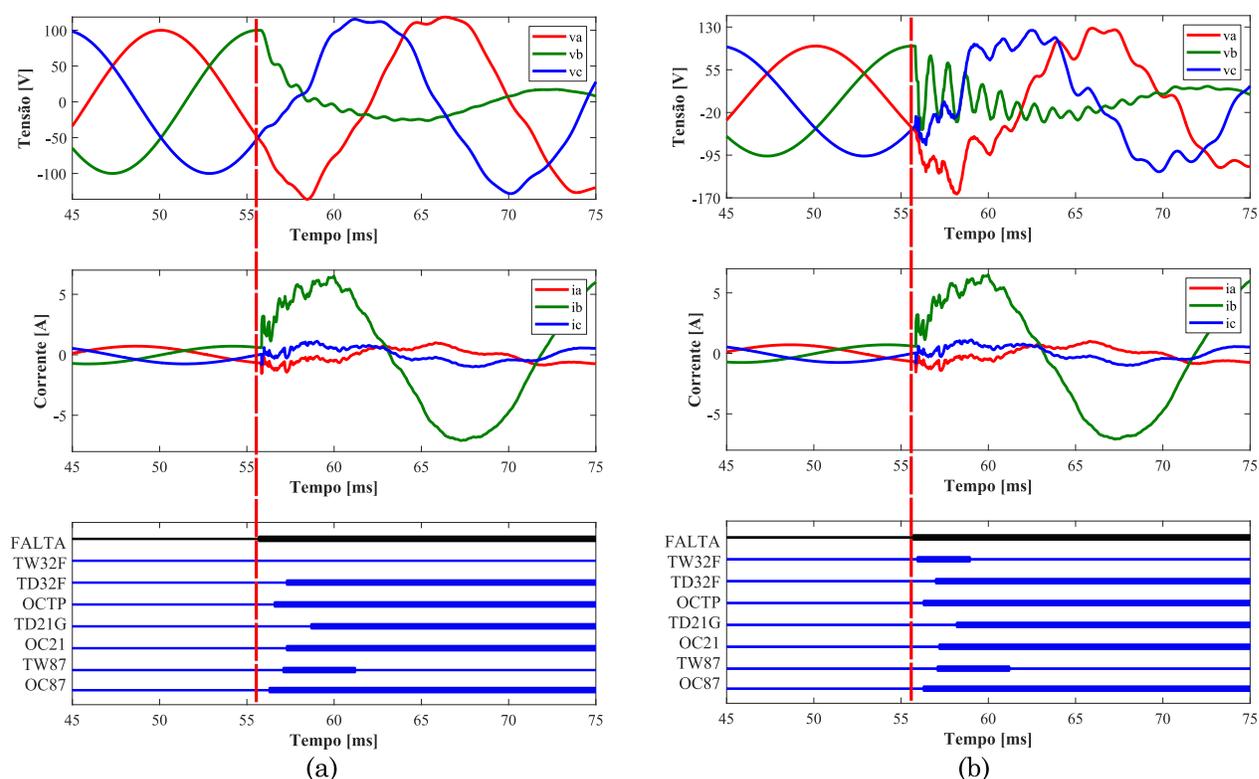


Figura 5.37: Caso 11 - Sinais por fase de tensões, correntes e saídas digitais considerando um (a) TPC e (b) um TP ideal

Observa-se na Figura 5.38 as saídas digitais e o disparo do esquema de proteção considerando um TPC e TP ideal. Ilustra-se o bit PTB que representa o sinal permissivo na fase B no terminal local e que é usado no esquema POTT para afirmar em conjunto com o bit direcional à frente TD32F o bit RXPRM (trip independente do esquema POTT), e que a sua vez através de uma lógica OR com a saída por fase dos sinais recebidos do esquema DTT (DTRXA, DTRXB e

DTRXC) ativa o bit COMPRM. O trip definitivo (TRIP) é comandado por uma lógica OR dos bits independentes dos esquemas assistidos por comunicação POTT e DTT, assim como, um trip incondicional que combina os elementos TD21G, TW87 e TD21P, como foi descrito na seção da Implementação do Esquema de Disparo.

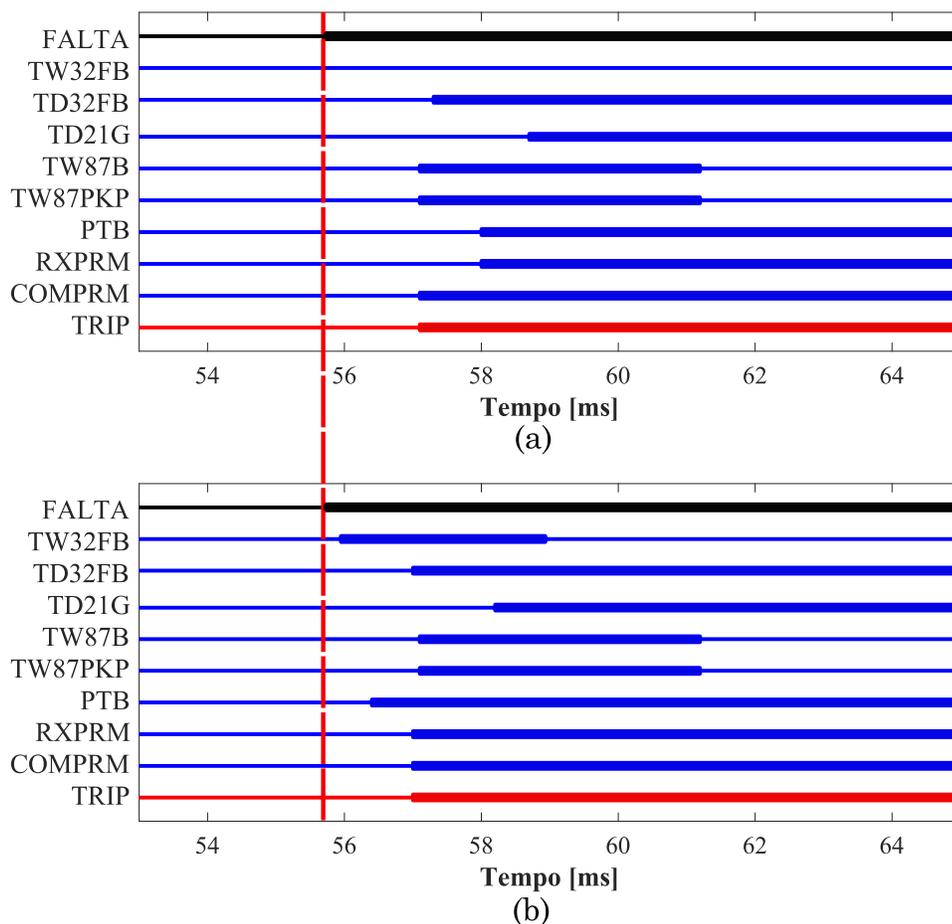


Figura 5.38: Caso 11 - Saídas digitais e o disparo considerando (a) um TPC e (b) TP ideal.

Na Figura 5.38, a operação do elemento direcional à frente TW32F no caso com TP ideal acelera o envio do sinal permissivo na fase B (PTB), de modo que, o bit PTB no terminal local afirma em 0,7 ms. Assim o esquema POTT opera na fase B, com a recepção do bit permissivo PTB e com o disparo do elemento direcional à frente TD32F na fase B (TD32FB). O bit RXPRM comandando pelo trip do esquema POTT afirma a saída do trip definitivo (TRIP) com um tempo de operação de 1,3 ms. Por outro lado, no caso de falta considerando o TPC o bit permissivo da fase B (PTB) demora mais por causa da não operação do elemento direcional à frente da fase B (TW32FB), afirmando no terminal local em 2,3 ms. Sua operação é comandada somente pelo elemento direcional TD32FB. Embora a rapidez do esquema POTT se veja comprometida, a

função diferencial da fase B (TW87B), conforme a Figura 5.38(a), assegurou um trip definitivo (TRIP) com um tempo de operação de 1,4 ms.

Portanto, conclui-se que o comportamento transitório do TPC não compromete a operação do esquema de proteção, enviando um trip rápido e confiável em apenas alguns milissegundos. Porém a atuação do elemento direcional à frente TW32F se vê afetada, devido à atenuação da tensão de TW no lado secundário do TPC, além disso, são observados tempos de operação ligeiramente maiores nos elementos baseados em grandezas incrementais (TD32F e TD21G). Contudo, TPCs reais incluem capacitâncias parasitas que são dominantes e diferentes em cada projeto de TPC, e criam um caminho para os componentes de alta frequência, permitindo o surgimento de alguns transitórios no lado secundário do TPC. Isto favorece a reprodução dos componentes de alta frequência, melhorando o desempenho dos elementos de proteção no domínio do tempo envolvidos.

5.3.3. SIMULAÇÃO PONTUAL 12: CURTO-CIRCUITO INTERNO MONOFÁSICO AT NA LT1, VARIANDO O MODELO DE LT

Neste caso pontual de falta se avaliou o influência do modelo de linha utilizado na simulação com o programa ATP, tais como: modelo de Bergeron a 60 Hz e 50 kHz e o modelo dependente da frequência (JMarti). Simularam-se três curto-circuito monofásicos AT francos ($R_f = 0 \Omega$) variando o modelo de linha, sendo aplicado no ponto 03 a 66 km do terminal local na linha LT1 do sistema da Figura 5.1, no máximo da tensão (90°). A LT é conectada a um sistema relativamente forte com um SIR de 0,55 nos terminais local e remoto.

Para cada modelo de linha usado foram realizados testes de energização com o extremo remoto aberto para identificar o tempo de propagação da linha. Foram obtidos tempos de propagação para o modelo de Bergeron a 60 Hz, modelo Bergeron a 50 kHz e modelo JMarti de 747,5 μs , 740,5 μs e 745,5 μs , respectivamente, sendo o tempo de propagação de um sinal na velocidade da luz de 733,33 μs . Esses valores servirão de ajuste para a função diferencial de TW (TW87).

Na Figura 5.39 são apresentados os sinais de TW de tensão e corrente do modo de propagação alfa que é mais significativo para uma falta monofásica na fase A (i_{TW1A} e v_{TW1A}) no terminal local. Uma das diferenças que pode ser percebida entre os modelos é a atenuação dos

sinais de TW, sendo no modelo Bergeron a 60 Hz a menos atenuada, apreciando-se as TW refletidas e incidentes com amplitudes maiores do que a dos outros dois modelos. Também, somente no modelo de Bergeron a 50 kHz nas TW de tensão e corrente apareceram sinais espúrios de pequena amplitude nos primeiros milissegundos das ondas incidentes e refletidas, mas ainda não se conseguiu identificar a sua natureza. Contudo, as funções de proteção de TW (TW32F e TW87) operaram confiavelmente, porém com uma diferença ligeira nos tempos de operação.

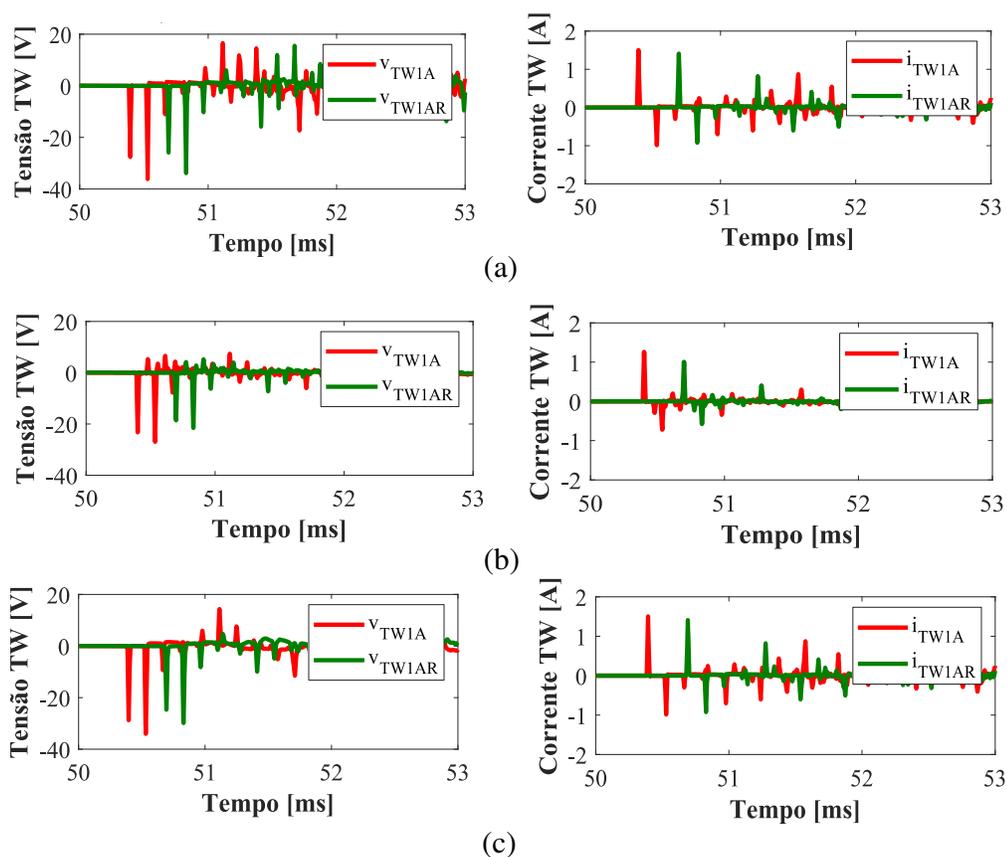


Figura 5.39: Caso 12 – Sinais de TW do modo de propagação alfa da fase A local e remota de tensão e corrente (a) Bergeron – 60 Hz, (b) Bergeron – 50 kHz e (c) JMarti.

No caso do elemento de proteção direcional à frente (TW32F), este atuou com um tempo de 0,3 ms nos três casos, e a função diferencial (TW87) apresentou tempos de atuação de 1,3 ms para o modelo de Bergeron a 60 Hz e JMarti, e de 1,6 ms para o modelo Bergeron a 50 kHz, como pode ser visto na Figura 5.40. O atraso no tempo de atuação do TW87 no caso do modelo Bergeron a 50 kHz deve-se à demora da afirmação do bit supervisor de sobrecorrente (OC87), visto na Figura 5.40(b). O cálculo do tempo de propagação da linha para cada modelo melhora o

desempenho da função diferencial de TW, já que nesse tempo é considerado o efeito de dispersão da TW.

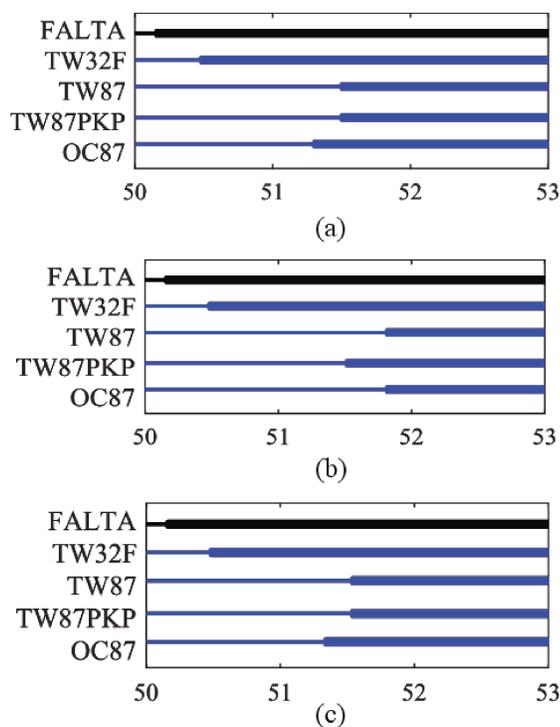


Figura 5.40: Caso 12 – Bits de saída dos elementos de proteção TW (a) Bergeron – 60 Hz, (b) Bergeron – 50 kHz e (c) JMarti

Apresentam-se na Figura 5.41 os sinais por fase de tensão e corrente, assim como, as saídas digitais dos elementos de proteção de onda viajante e grandezas incrementais (TD32F, TD21G, TW32F e TW87) e dos elementos supervisores de sobrecorrente (OCTP, OC21 e OC87), considerando os três modelos usados de linha.

Conforme já foi discutido na Figura 5.39, o elemento direcional à frente TW32F e a função diferencial TW87 atuaram confiavelmente. Por outro lado, nos elementos baseados em grandezas incrementais se observou que os tempos de operação são maiores considerando o modelo Bergeron a 50 kHz. O elemento de proteção direcional à frente (TD32F) operou em 1,3 ms com o modelo Bergeron a 60 Hz e JMarti, e em 2 ms com o modelo Bergeron a 50 kHz. O elemento de distância de terra (TD21G) operou em 2,7 ms e 2,8 ms com o modelo Bergeron a 60 Hz e JMarti, respectivamente; no caso do Modelo Bergeron a 50 kHz não atuou. A não atuação do elemento TD21G ocorreu porque o elemento supervisor de sobrecorrente OC21 não foi sensibilizado, e isto

é devido às pequenas mudanças na corrente originadas pela atenuação no modelo de Bergeron a 50 kHz, como pode ser visto na Figura 5.41(b).

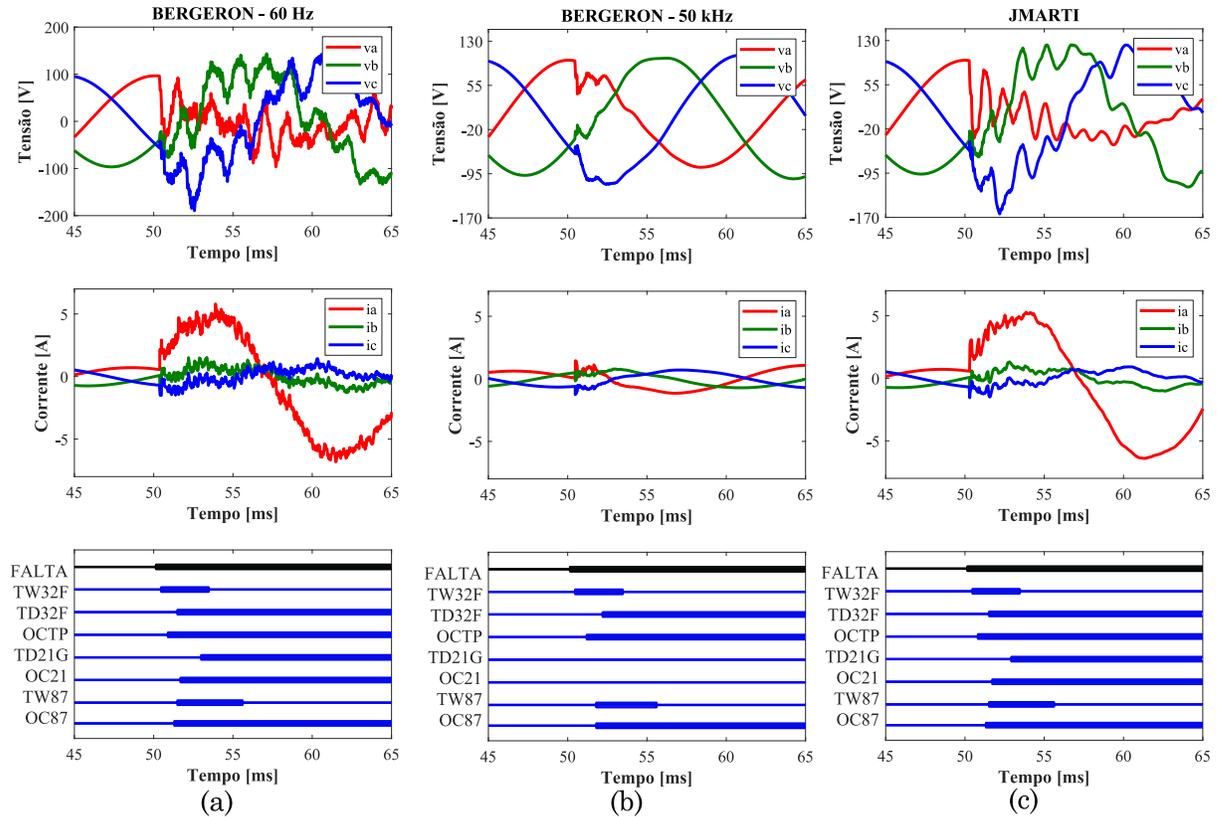


Figura 5.41: Caso 12 - Sinais por fase de tensões, correntes e saídas digitais considerando um modelo de linha (a) Bergeron – 60 Hz, (b) Bergeron – 50 kHz e (c) JMarti.

Não obstante, os disparos definitivos (TRIP) para cada modelo considerado foram comandados pela função diferencial de TW (TW87) com tempos de operação de 1,3 ms (Bergeron 60 Hz e JMarti) e de 1,6 ms (Bergeron 50 kHz).

5.3.4. SIMULAÇÃO EM MASSA 04: DESEMPENHO DO ESQUEMA DE PROTEÇÃO

Aplicaram-se faltas monofásicas AT, BT e CT mantendo as tensões pré-falta nos terminais em 1 pu, variando as seguintes grandezas: ângulo de incidência entre 0°, 45° e 90°; resistência de falta entre 0 Ω e 125 Ω com passos de 25 Ω; o nível de carga através do ângulo de transmissão entre -25° e 25° com passos de 10°; e o nível de curto-circuito variando o SIR entre 0,1 e 2.

São registrados os tempos de operação do disparo e representados através de um gráfico visual em formato de diagrama de caixas ou também conhecido como boxplot, uma ferramenta

gráfica para análise de dados estatísticos observados por meio de quartis. Conforme mostrado na Figura 5.42, o diagrama de caixa é composto pelo tempo de operação mínimo, representado pela cauda inferior; o máximo tempo de operação para 25% dos casos simulados (o primeiro quartil), representado pelo limite inferior da caixa; o máximo tempo de operação para 50% dos casos simulados (a mediana), representado pela linha média da caixa; o máximo tempo de operação para 75% dos casos simulados (o terceiro quartil), representado pelo limite superior da caixa; e o tempo de operação máximo, representado pela cauda superior.

Os tempos de operação do disparo são mais rápidos para ângulos de incidência entre 45° e 90°, ou seja, para valores da tensão pré-falta no ponto de falha perto do seu valor de pico. Por outro lado, são obtidos tempos de operação mais lentos quando o defeito é aplicado para valores de tensão próximos ao cruzamento pelo zero. São conseguidos tempos entre 1 ms a 1,5 ms para faltas perto do pico da tensão e tempos entre 2,5 ms a 3 ms para faltas próximas a 0°. Esta mudança nos tempos de operação é conhecida como o efeito do ponto na onda de tensão.

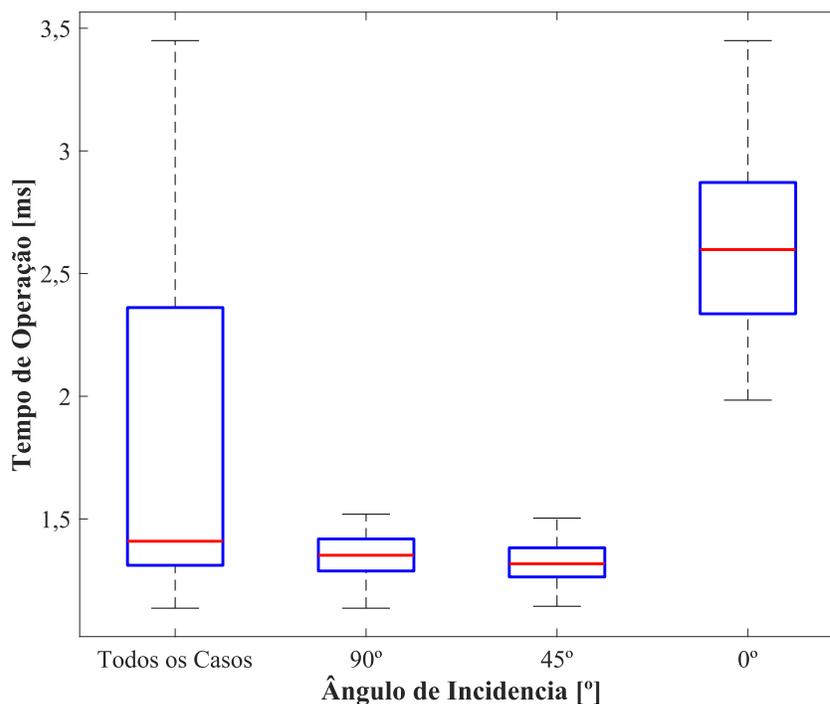


Figura 5.42: Influência do ângulo de incidência nos tempos de operação do trip.

Na Figura 5.43 ilustra-se a variação do nível de curto-circuito do sistema equivalente através do SIR, avaliando-se os tempos de operação do disparo para sistemas fortes ($0,1 \leq \text{SIR} < 1$) e fracos ($1,5 \leq \text{SIR} \leq 2$). São apresentados casos simulados considerando-se o

efeito do ponto na onda de tensão (ângulo de incidência 0°) e casos de falta simulados com valores perto do pico da tensão (ângulo de incidência 45° e 90°), conforme representado na Figura 5.43(a) e Figura 5.43(b), respectivamente. Há uma variação nos tempos de operação em 1,5 ms aproximadamente. Verifica-se também que o nível de curto-circuito não influencia nos tempos de operação do disparo, de modo que mesmo que a operação do elemento de distância TD21 se torne lenta para sistemas fracos, isto não afetará na rapidez do esquema de disparo.

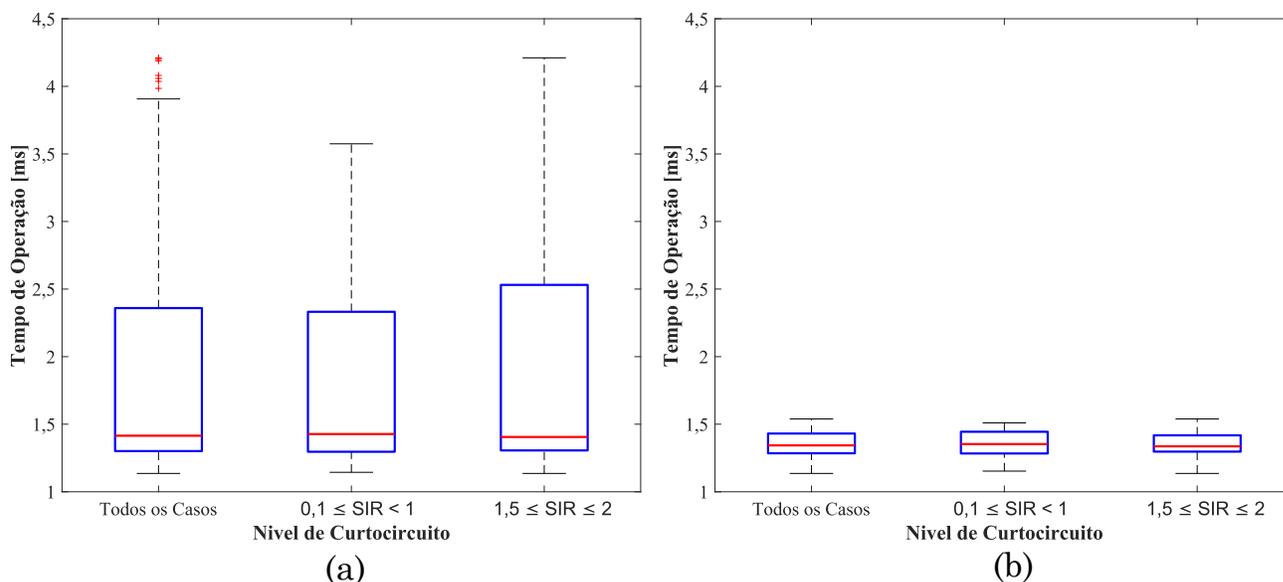


Figura 5.43: Variação do nível de curto-circuito (SIR) considerando o efeito do ponto na onda de tensão (a) com valor nulo e (b) somente com valor perto do pico.

Na Figura 5.44 são apresentados os casos para avaliar a influência do ângulo de transmissão nos tempos de operação do disparo para 162 faltas francas com ângulo de incidência de 90° e com um SIR de 0,1. O nível de carga no sistema elétrico não influencia nos tempos de operação do esquema de disparo. Isto decorre do fato de que os elementos de proteção baseados em grandezas incrementais dependem somente das componentes induzidas pelas faltas e da tensão de operação pré-falta no ponto de falta. Mesmo que o valor dessa tensão varie com o nível de carregamento da linha, a detecção pelas ondas viajantes não é afetada, de modo que estes elementos atuam acelerando o disparo do esquema de proteção independentemente do nível de carga, atingindo tempos de operação entre 1,2 ms a 1,4 ms, como mostrado na Figura 5.44.

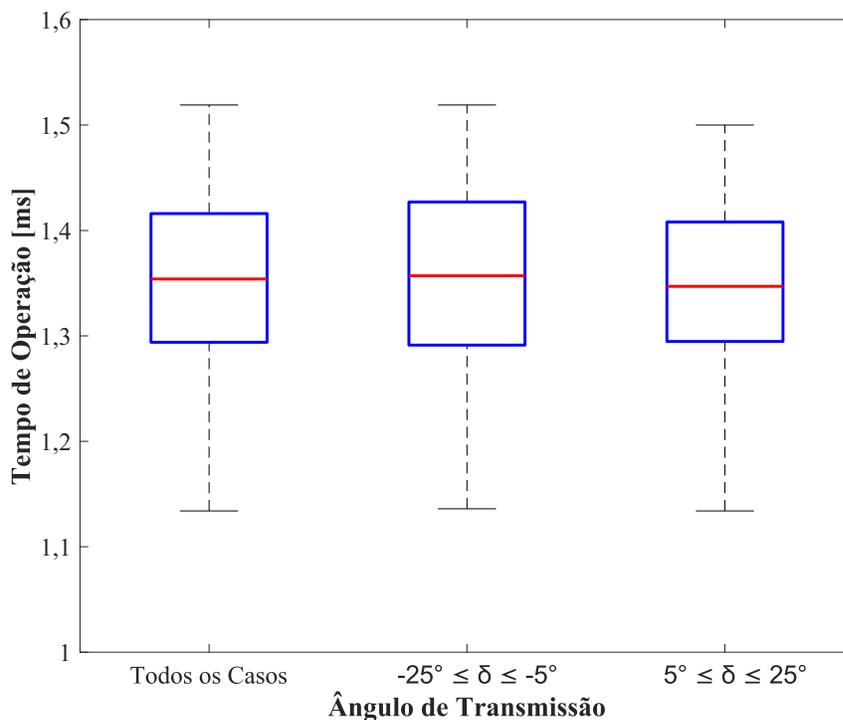


Figura 5.44: Influência do ângulo de transmissão nos tempos de operação do disparo.

Na Figura 5.45 ilustra-se a influência da resistência de falta nos tempos de operação do disparo para 189 faltas que foram aplicadas com um ângulo de incidência de 90° em um sistema elétrico com um ângulo de transmissão de -15° e um SIR de 0,1. Não houve variação importante nos tempos de operação, que ficaram entre 1,25 ms a 1,45 ms. Embora, a atuação do elemento de distância TD21 seja comprometida pela resistência de falta, a quase imunidade do disparo deve-se à rapidez da função diferencial TW87 que depende da sensibilidade do ajuste de sobrecorrente OC87 usado nas simulações.

Mesmo assim, na prática os elementos no domínio do tempo são desenvolvidos com o intuito de operar em paralelo com um relé tradicional (baseado em fasor). Assim é importante deixar claro que durante condições de um curto-circuito não crítico em termos de estabilidade para o sistema elétrico, a confiabilidade e a sensibilidade da operação do sistema de proteção serão definidas pelo relé tradicional, e em consequência, os tempos de operação serão maiores e definidos por estes relés. De fato quando houver uma mudança importante nos sinais de tensão e corrente (curto-circuito crítico), sendo estes os mais preocupantes em termos de estabilidade para o sistema como no caso de faltas francas, os elementos no domínio do tempo irão acelerar os tempos de proteção.

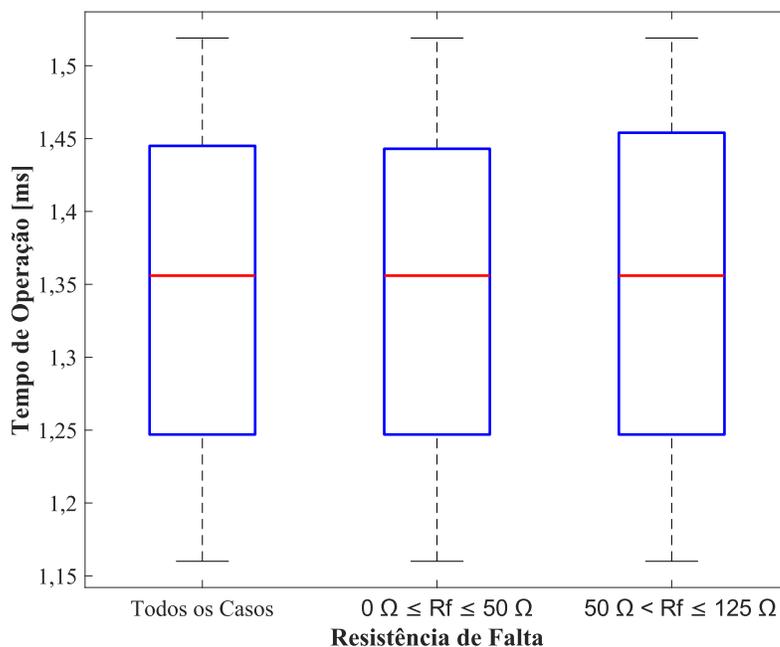


Figura 5.45: Influência da resistência de falta nos tempos de operação do disparo.

5.3.5. DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE OPERAÇÃO NOS ELEMENTOS DE PROTEÇÃO TD E TW

Nesta seção é apresentada a distribuição dos tempos de operação dos elementos baseados em grandezas incrementais (TD) e ondas viajantes (TW), com o intuito de observar o seu comportamento ante as diferentes variações do defeito e do sistema. Para isto são apresentados os percentuais de operações com sucesso dos casos de falha simulados. Especificamente foram rodados 729 casos de falta em toda a extensão da linha com variações na distância de falta entre 0,1 pu a 0,9 pu com passos de 0,1 pu; os tipos de falta foram AT, BT e CT; ângulo de incidência entre 0°, 45° e 90°; resistência de falta entre 0 Ω e 125 Ω com passos de 25 Ω ; ângulo de transmissão entre -25° a -5° com passos de 10°; e mantendo um SIR constante de 0,1.

Na Figura 5.46 são apresentados os percentuais das operações dos elementos TD e TW que tiveram sucesso. O elemento direcional à frente TD32F opera para todos os casos simulados, isto revela que o elemento é confiável para diferentes condições do defeito e do sistema elétrico. No caso do elemento de distância de terra TD21G verifica-se que aproximadamente 76% dos casos simulados foi correto, mas isto ocorre porque ele é um elemento com subalcance ajustado para operar até seu ponto de alcance pretendido (TD21MG = 0,7 pu). Por outro lado, o elemento direcional à frente TW32F e a função diferencial TW87 apresentaram a mesma quantidade

percentual de operação na ordem de 67%, na qual todos os casos com ângulo de incidência diferente de 0° foram corretos.

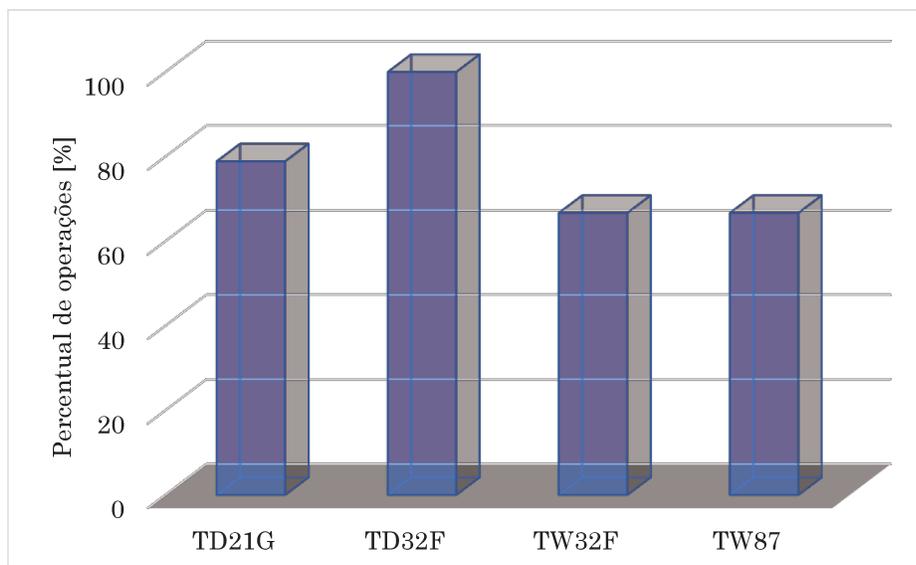


Figura 5.46: Percentual de operações: TD21G, TD32F, TW32F e TW87

Para observar a distribuição dos tempos de operação nos elementos de proteção (TD32F, TD21G, TW32F e TW87) são usados gráficos da função densidade de probabilidade, na qual observa-se a maior densidade dos tempos de atuação dentro de uma faixa de operação recorrente. Os tempos de operação são registrados no relé localizado no terminal local.

Na Figura 5.47 tem-se a distribuição das operações com sucesso dos elementos TD para 729 casos de falta simulados. São conseguidos tempos de operação entre 1,2 ms a 2,5 ms no elemento direcional à frente TD32F, como mostrado na Figura 5.47(a). Esses tempos de operação são detectados em toda a extensão da linha. Por outro lado, ilustram-se também os tempos de operação entre 1,5 ms a 4 ms no elemento de distância de terra TD21G, as quais foram detectados na primeira metade da linha; e os tempos de operação entre 6 ms a 9 ms para faltas próximas do seu ponto de alcance e quando a falta se torna resistiva, conforme representado na Figura 5.47(b).

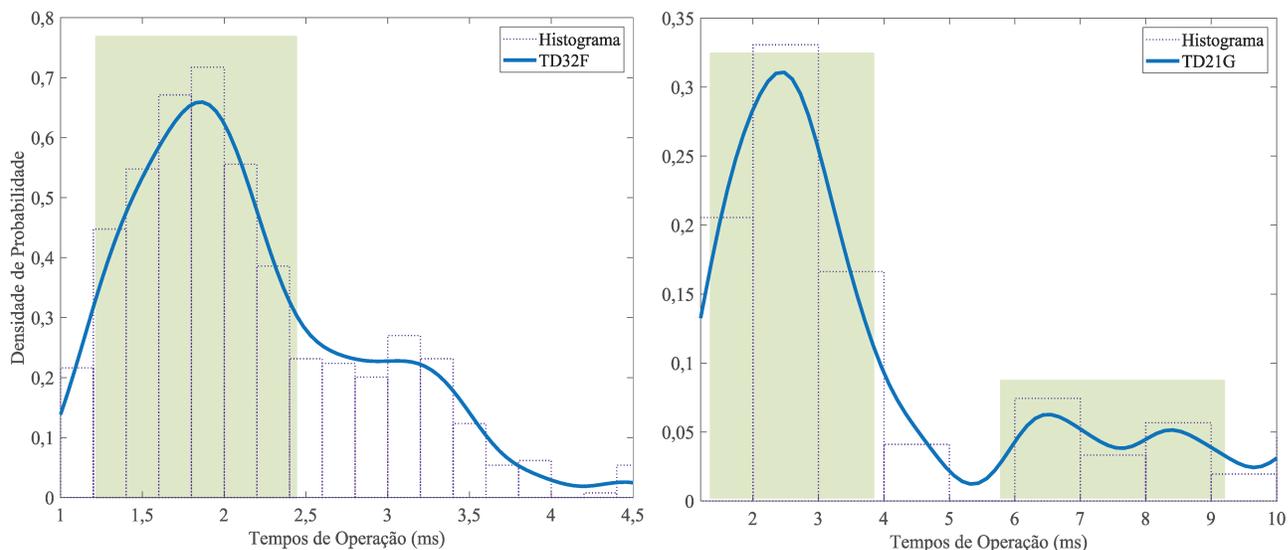


Figura 5.47: Distribuição das operações dos elementos TD: (a) elemento direcional à frente TD32F e (b) elemento de distância TD21G.

Na Figura 5.48 observa-se a distribuição das operações com sucesso dos elementos TW para 729 casos de falta simulados. São conseguidos tempos de operação entre 0,25 ms a 0,7 ms no elemento direcional à frente TW32F, como mostrado na Figura 5.48(a). Este é o elemento de proteção que atua mais rapidamente dentre os implementados. Por outro lado, ilustra-se também os tempos de operação entre 1,3 ms a 1,5 ms na função diferencial TW87. A demora na sua atuação depende do comprimento da linha e da afirmação do seu elemento de supervisão de sobrecorrente.

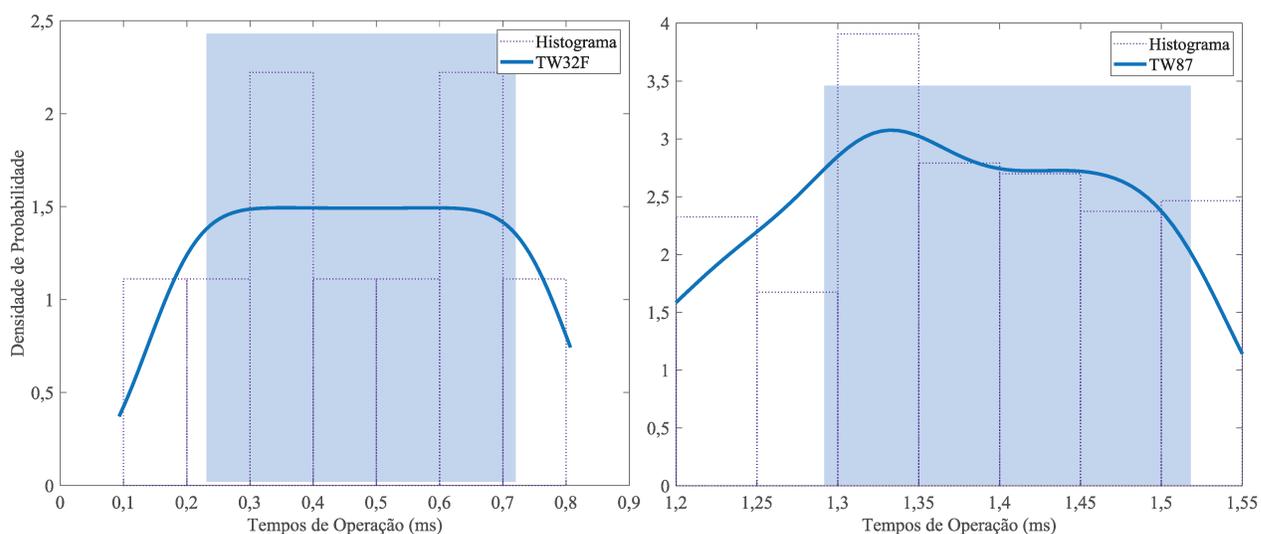


Figura 5.48: Distribuição das operações dos elementos TW: (a) elemento direcional à frente TW32F e (b) a função diferencial TW87.

Na Figura 5.49 pode-se observar a distribuição das operações do disparo para os 729 casos simulados de falta. Cabe ressaltar que o esquema de proteção disparou em todos os casos. Ilustra-se que os tempos de operação são distribuídos entre 1,2 ms e 1,5 ms, onde o esquema é acelerado pela atuação dos elementos TW; e entre 2 ms a 3,5 ms, quando o esquema é comandado pelos elementos TD. Por exemplo, no caso das atuações do disparo mais rápidas a maioria dos casos operaram devido à operação da função diferencial TW87; por outro lado os disparos mais lentos são devidos à atuação do esquema POTT ou do elemento de distância TD21. Por exemplo, se for pelo esquema POTT o disparo é igual ao tempo da atuação da proteção TD32 mais o permissivo, se for pelo elemento de distância para uma falta bem perto do relé local, a função TD21 local atua rapidamente enviando um sinal de transferência direta através do esquema DTT para que o relé no terminal remoto inicie um disparo também.

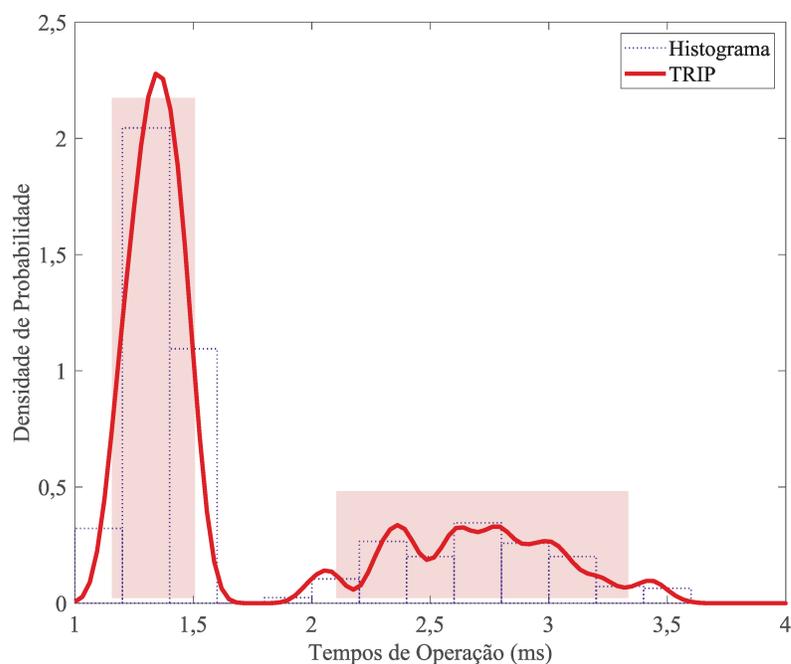


Figura 5.49: Distribuição das operações do disparo.

Neste capítulo foram abordados diversos casos de simulações pontuais e em massa de faltas aplicados em dois sistemas de testes. Cada sistema foi escolhido com o intuito de mostrar que em diferentes condições do sistema e de defeito os elementos de proteção implementados na MODEL do *software* ATP respondem adequadamente e com bastante sucesso. No entanto, sua operação torna-se comprometida em algumas faixas de operação como, por exemplo, no

elemento TD21, quando a falta é resistiva e aproxima-se a seu limite de alcance ou nos elementos de TW quando o ângulo de incidência do defeito é próximo da passagem por zero na tensão no local do defeito. Assim, para conseguir uma resposta mais confiável, segura e rápida os quatro elementos de proteção foram combinados dentro de uma lógica de disparo baseado na referência (SEL, 2017), obtendo tempos de operação na ordem de alguns milissegundos. Isto comparado com relés tradicionais (baseados em fasor) é uma grande vantagem, já que a proteção acelera o desligamento da linha de transmissão, resultando numa maior transmissão de potência estável na pré-falta, sem descuidar da segurança do sistema elétrico em termos de estabilidade. Em termos de desempenho se observou que a resposta de cada elemento de proteção assemelha-se à resposta dos relés modernos atuais implementados em *hardware*. Portanto, pode-se afirmar que a simulação *Software-in-the-Loop* (SIL) no programa ATP foi adequada para avaliar a interação dinâmica entre o sistema elétrico e o relé implementado, considerando a atuação do relé. Por último, é necessário mencionar que os elementos de proteção no domínio do tempo ideais, que são usados nos sistemas elétrico reais, foram desenvolvidos com a intenção de operar em paralelo com relés tradicionais baseados em fasor. Assim sua operação acelera o disparo do esquema de proteção quando houver um evento de falta que evidencie uma mudança brusca nos sinais monitorados de tensão e corrente, diminuindo o tempo de eliminação da falta, e, como consequência, torna a operação do sistema mais segura em termos de estabilidade. Já o relé tradicional mantém a confiabilidade e segurança do esquema de proteção durante eventos de falta que não comprometam a estabilidade do sistema.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE LINHAS DE PESQUISAS FUTURAS

Neste trabalho foram analisados os princípios e as lógicas de operação da proteção no domínio do tempo para linhas de transmissão. Em decorrência da rapidez nos seus tempos de resposta, na ordem de alguns milissegundos, vislumbram-se vantagens para o sistema elétrico, despertando o interesse das empresas do setor e tornando esta proteção a nova tendência no sistema de potência para linhas de transmissão. Sua operação baseia-se na teoria de grandezas incrementais (TD) e na teoria de ondas viajantes (TW), das quais nascem funções de proteção que, ao serem combinadas dentro de uma lógica de disparo assistido por comunicação, cobrem uma gama de eventos de faltas com disparo ultrarrápido.

Nesse sentido foram desenvolvidos computacionalmente através do programa ATP e de sua linguagem interna MODELS quatro elementos de proteção, assim como, o processamento e aquisição dos sinais que faz parte do relé digital implementado. Os seguintes elementos de proteção foram simulados: dois direcionais baseados nos princípios TD e TW, chamados de TD32 e TW32, respectivamente; um elemento de distância baseado em TD, chamado TD21; e um esquema diferencial baseado em TW, chamado TW87.

Deve-se destacar que no estudo foi implementado o teste de software em malha fechada (SIL – *software in the loop* através da modelagem acima descrita num ambiente de simulação do sistema elétrico em conjunto com as proteções, o que é uma contribuição importante da pesquisa.

Com o propósito de validar o desempenho dos elementos de proteção (TD e TW) desenvolvidos foram simulados vários cenários de falta pontuais e em massa, as quais incluem variações na localização do defeito, tipo de falta, resistência de falta, ângulo de incidência (efeito do ponto na onda de tensão) e o nível de curto-circuito através do SIR. Durante as simulações do

desempenho das proteções TD e TW foi verificado que os sinais de operação dos elementos de proteção TD32, TD21, TW32 e TW87 foram corretamente gerados para as diversas falhas.

No caso do elemento direcional TD32 para faltas à frente o torque de operação (SOP) é positivo e maior do que o torque de restrição à frente (SFWD), e para faltas reversas o torque de operação é negativo e menor do que o torque de restrição reverso (SREV). Observou-se que o TD32 é bastante confiável, possuindo uma grande margem de segurança na sua operação para diversas condições do defeito e do sistema em toda a extensão da linha. Nas simulações em massa este elemento não apresentou variação nos seus tempos de operação em sistemas fortes ou fracos, mas observou-se uma variação de 1,5 ms para o ângulo de incidência do defeito.

No caso do elemento de distância TD21 sendo supervisionado pelo elemento TD32, este atua confiavelmente dentro da sua zona de alcance. Verificou-se que para faltas próximas do relé local a tensão de operação (V21OP) cresce com grandes magnitudes, atingindo valores muito acima da tensão de restrição (V21RST), assegurando uma atuação rápida, e nas proximidades do seu ponto de alcance, quando a tensão de operação e de restrição tendem a se aproximar, a sua atuação pode ser comprometida, tornando-se mais lenta. Nas simulações em massa o elemento TD21 opera mais rápido para defeitos próximos ao relé e é mais lento para faltas resistivas e mais próximas do seu alcance. Também observou-se que o elemento TD21 opera em média abaixo de 3 ms para faltas mais próximas em um sistema forte, e opera aproximadamente acima de 5 ms para faltas muito próximas ao ponto de alcance para sistemas relativamente fracos. Por outro lado, a influência do ângulo de incidência apresentou variação nos seus tempos de operação de 3 ms.

No caso do elemento direcional TW32, verificou-se que para faltas à frente e reversas o torque acumulado é positivo e negativo, respectivamente, sendo o valor absoluto maior encontrado na fase sob defeito. A resposta do TW32 é imediata após o defeito e é definida pelo tempo que a TW percorre desde o ponto de falta até o relé. É importante lembrar que o tempo de integração que deve ser adequado (100 μ s) para que o elemento simulado opere confiavelmente. Pela sua própria natureza sua não atuação é influenciada pelo efeito do ponto na onda de tensão (cruzamento pelo zero).

No caso da função ou esquema diferencial TW87 verificou-se a sua confiabilidade e segurança em circuitos paralelos, respondendo com sucesso. Durante faltas à frente se verificou

que a corrente de operação (i_{OP}) era maior do que a corrente de restrição (i_{RS}), e que as TW nos terminais local e remoto possuíam polaridades iguais. A localização da falta foi estimada corretamente, dentro do intervalo 0 pu e 1 pu, e a tensão de polarização (VPOL) apresentou a mesma polaridade da corrente de operação. Foi verificado que o tempo de operação depende do comprimento da linha e está associado ao tempo de propagação, adicionado da latência do canal de comunicação (nesta pesquisa a latência do canal foi suposta ideal).

Destaca-se que o ângulo de incidência da falta é uma variável que afeta os tempos de operação das proteções TD e TW. Nas grandezas incrementais, que não são dependentes do nível de carga do sistema elétrico, mas sim do ponto de tensão de operação no ponto de falta, é interessante notar que a variação nos seus tempos de operação não é apenas definida pela magnitude do valor pré-falta, mas também varia com a derivada da tensão no início do defeito. Em contrapartida, as funções de TWs, pela sua própria natureza, não podem detectar faltas para ângulos de incidência próximos da passagem da tensão por zero (efeito do ponto na onda de tensão).

Usando uma combinação das técnicas de proteção baseadas em grandezas incrementais e ondas viajantes para conseguir tempos de operação mais rápidos, com um esquema assistido por comunicação ideal, modelou-se um esquema de disparo para processar o disparo, enviar e receber sinais de disparo de transferência permissivos e diretos. Implementou-se um disparo independente assistido por comunicações dos esquemas POTT (*Permissive Overreach Transfer Trip*) e DTT (*Direct Transfer Trip*), e uma lógica de disparo incondicional na qual são embutidos os elementos de proteção TD21P, TD21G e TW87, de modo que se qualquer um desses elementos afirma através de uma lógica OR é iniciado o disparo. Foram implementados elementos de sobrecorrente que supervisionam a sensibilidade da atuação da função diferencial TW87, o elemento de distância TD21, e o esquema POTT através da afirmação dos bits OC87, OC21 e OCTP, respectivamente.

Simulações em massa variando as condições do defeito e do sistema conectado equivalente foram efetuadas com a finalidade de validar o esquema de disparo implementado. Das simulações foi observado que o disparo é influenciado pelo ângulo de incidência, conseguindo tempos entre 1 ms a 1,5 ms para faltas perto do pico da tensão e tempos entre 2,5 ms a 3 ms para faltas com ângulo de incidência de zero graus. Isto se deve à operação do esquema de disparo que é

comandada pela atuação dos elementos baseados em grandezas incrementais, TD e não pelos elementos baseados em ondas viajantes, que tendem a acelerar o disparo, TW. A variação do nível de curto-circuito efetuada através do SIR, mantendo um ângulo de incidência constante dentro de uma faixa de operação, não impactou nos tempos de disparo, obtendo-se tempos na ordem 1,5 ms para sistemas fortes ou fracos. Mesmo que a operação do elemento TD21 seja mais lenta para sistemas fracos, a combinação em paralelo com os outros elementos de proteção asseguram uma operação rápida. Com respeito ao nível de carga no sistema elétrico na pré-falta não se observou uma mudança nos tempos de disparo, atingindo-se tempos entre 1,2 ms a 1,4 ms independente do sentido do fluxo de potência. Por último, a variação da resistência de falta não resultou em variação nos tempos de disparo, estando sempre na ordem de 1,25 ms a 1,45 ms. Para faltas altamente resistivas a rapidez do disparo deve-se ao fato da atuação da função diferencial TW87 que depende da sensibilidade do seu ajuste de sobrecorrente OC87 usado nas simulações.

Portanto, dos resultados obtidos, pode-se concluir que o comportamento e o desempenho das funções de proteção desenvolvidas (TD32, TD21, TW32 e TW87) são bem similares a dos relés comerciais atuais (SCHWEITZER et al., 2016a), reportados na literatura especializada, o que permite dizer que o modelo computacional implementado responde adequadamente às condições de distúrbios em um sistema elétrico de potência. Além disso, se enfatiza que esses elementos operando em combinação dentro de uma lógica de disparo assistido por comunicação, proporciona um disparo de fato rápido, seguro e confiável para toda a extensão da linha de todos os casos de falta simulados, variando-se o tipo de falta, ângulo de incidência, nível de carga do sistema na pré-falta, nível de curto-circuito e resistência de falta. Porém, é importante ressaltar que as funções de proteção TW e TD implementadas nos relés comerciais atuais foram projetadas com o objetivo de dar segurança ao sistema elétrico em termos de estabilidade, acelerando os disparos da proteção durante curtos-circuitos adversos ou críticos, mantendo a segurança do esquema de proteção durante situações não tão severas. Por isso, que recomenda-se que estas proteções sejam utilizadas em associação com um relé parceiro trabalhando em paralelo no domínio fasorial, provendo maior sensibilidade para faltas menos severas e velocidade para curtos-circuitos mais adversos.

Continuando com a elaboração de temas de trabalhos futuros, é possível destacar alguns pontos que ainda merecem atenção especial, tais como:

- Modelar o transformador de potencial para avaliar a sua influência nos resultados obtidos, uma vez que o sinal secundário será atenuado e distorcido.
- Avaliar o impacto do modelo de linha utilizado, incluindo a correta representação da transposição da linha e a importância da representação da dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência.
- Avaliar a sensibilidade dos resultados para diferentes passos de integração e sua relação com a taxa de amostragem do sinal.
- Modificar e verificar a resposta do sistema de proteção implementado para LTs com compensação em série.
- Modificar e analisar o desempenho da proteção implementada para LTs mistas, considerando as seções na qual a velocidade de propagação muda.
- Testar o desempenho da proteção no domínio do tempo em LTs de grande comprimento (até 500 km), principalmente para as grandezas incrementais.
- Adaptar os algoritmos e lógicas da proteção no domínio fasorial ao esquema de disparo implementado para avaliar a operação em conjunto.
- Incluir um localizador de falta em tempo real de TW para linhas mistas, para identificar as seções de bloqueio na qual a função de religamento monopolar não deveria atuar.
- Aplicar a teoria baseada em grandezas incrementais e ondas viajantes a outros componentes elétricos do sistema de potência.
- Testar e validar o modelo desenvolvido através de simulações em tempo real com relés comerciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOUD, R. Domínio do Tempo e seus Benefícios Aplicados à Nova Dinâmica do Sistema Elétrico. XV Encontro para Debates de Assuntos de Operação (EDAO), 2018.

ANDO, M.; SCHWEITZER, E. O. I.; BAKER, R. A. Development and Field-Data Evaluation of Single-End Fault Locator for Two-terminal HVDC Transmission Lines - Part 2: Algorithm and Evaluation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 00, n. 12, p. 3531–3537, 1985.

BAINY, R. G. et al. Transformadores de Potencial Capacitivo Sobre a Estimação de Fasores de Tensão. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 1–6, 2012.

BENMOUYAL, G. Removal of DC-Offset in current waveforms using digital mimic filtering. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 2, 1995.

COSTA, F. B. et al. Two-terminal traveling-wave-based transmission-line protection. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 32, n. 3, p. 1382–1393, 2017.

COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Effects of the fault inception angle in fault-induced transients. IET Generation, Transmission and Distribution, v. 6, n. 5, p. 463–471, 2012.

DOUGLASS, D. A.; TECHNOLOGIES, P. Current Transformer accuracy with asymmetric and high frequency fault currents. n. 3, p. 1006–1012, 1981.

ENGLER, F. et al. Transient signals and their processing in an ultra high-speed directional relay for EHV/UHV transmission line protection. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-104, n. 6, p. 1463–1473, 1985.

ESPINOZA, R. G. F. Análise de Proteção de Linhas de Transmissão Através de Relés Numéricos e Uso de Models Externos No ATP (Alternative Transient Program). p. 2008–2010, 2011.

GUZMÁN, A. et al. Traveling-wave and incremental quantity directional elements speed up directional comparison protection schemes. 2018a

GUZMÁN, A. et al. Accurate and Economical Traveling-Wave Fault Locating Without Communications. 2018b.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing. p. 1–61, 2004.

JOHNS, A. T. New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of e.h.v. transmission lines. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, v. 127, n. 4, p. 228, 1980.

KASZTENNY, B. et al. Practical Setting Considerations for Protective Relays that Use Incremental Quantities and Traveling Waves. 43rd Annual Western Protective Relay Conference, n. February, 2016.

KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; MULTILIN, G. E. Rebirth of the Phase Comparison Line Protection Principle. 59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006., p. 60 pp., 2006.

KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L. Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 4, p. 1927–1935, 1992.

KIM, C. et al. Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines. n. I, 2000.

LOPES, F. V.; LEITE, E. J.; PAULO, J. Avaliação de Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo. VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, p. 1–6, 2016.

LUO, X.; KEZUNOVIC, M. Interactive Protection System Simulation Using ATP MODELS and C++. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, p. 1–6, 2006.

M. CHAMIA, S. L. Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines – Development, Design, and Application. n. 6, p. 2104–2116, 1978.

MARX, S. et al. Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing, and Results. 16th Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference Atlanta, Georgia, p. 1–14, 2013.

MOLAS, E. C.; SILVA, K. M. Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no ATP. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (IV SBSE), p. 1–6, 2012.

PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. S. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. Generation, Transmission & Distribution, IET, v. 1, n. 2, p. 182–197, 2007.

PANEZ, J. Modelagem de um relé de proteção direcional de linhas de transmissão no ATP. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2016.

PAULINO, M. E. C.; PENARIOL, G. S. A Evolução de Sistemas de Proteção e Modelos para Testes de Relés de Proteção. Sbsse 2012, p. 1–6, 2012.

REDFERN, M. A. et al. A Laboratory Investigation into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection . v. 2, n. 1, 2003.

RIBEIRO, B. Proteção Diferencial Cruzada de Linhas de Transmissão de Circuito Duplo Usando Ondas Viajantes de Corrente. [s.l.] Universidade de Brasília, 2018.

RIBEIRO, E. P. A. et al. ATP / MODELS Differentiator-Smoother Filter Model Validated Using Actual Time-Domain Relay. p. 1–4, 2018.

RIBEIRO, E. P. A. Modelagem do Filtro Differentiator-Smoother: Validação via Análise de Transitórios e Resposta em Frequência de Dispositivos Microprocessados Reais. The Brazilian Congress on Quality of Electric Power (CBQEE), 2019.

RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V. Time-Domain Protection Elements: Study and Implementation. Simposio Brasileiro de Sistemas Electricos (SBSE), 2108.

SCHWEITZER, E. O. et al. Locating Faults by the Traveling Waves They Launch. 50th Annual Minnesota Power Systems Conference. Anais...2014

SCHWEITZER, E. O. et al. Speed of line protection - Can we break free of phasor limitations? 2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2015, p. 448–461, 2015.

SCHWEITZER, E. O. et al. Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults. 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 2016a.

SCHWEITZER, E. O. et al. Defining and Measuring the Performance of Line Protective Relays. 70th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, n. October 2016, 2016b.

SCHWEITZER, E. O. et al. Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves Accurate single-end fault location and line-length estimation using. 2016c.

SCHWEITZER, E. O. et al. New time-domain line protection principles and implementation. 13th International Conference on Developments in Power System Protection, Edinburgh, UK, n. March 2016, p. 1–6, 2017.

SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B. Distance protection: Why have we started with

a circle, does it matter, and what else is out there? 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2018, v. 2018- Janua, p. 1–19, 2018.

SEL. SEL-421 Protection, Automation, and Control System. 2011.

SEL. SEL-T400L Transmission Line Relay Ultra-High-Speed Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder. [s.l: s.n.].

SEL. Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder. [s.l: s.n.].

SEL T400L. Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder Instruction Manual. 2017.

SHARMA, S.; MYNAM, M. V. Experiência em Campo Com um Relé de Linhas de Transmissão de Ultra-Alta-Velocidade e Localizador de Faltas por Ondas Viajantes. 45th Annual Western Protective Relay Conference Spokane, 2019.

SILVA, E.; LOPES, F. V.; SILVA, K. M. Time-domain application of superimposed quantities in the phase comparison transmission line protection scheme. v. 2018, n. Dpsp, p. 1360–1364, 2018.

SILVA, K. M.; NEVES, W. L.; SOUZA, B. A. EMTP Applied to Evaluate Three-Terminal Line Distance Protection Schemes. International Conference on Power Systems Transients (IPST), p. 1–6, 2007.

VITINS, M.; BOVERI, B. A Fundamental Concept for High Speed Relaying. n. 1, p. 163–173, 1981.

YAMAMOTO, T. et al. Fault Protection Based on Travelling Wave Theory (Part I-Theory). Electrical Engineering in Japan, v. 98, n. 1, p. 79–86, 1979.

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA AVALIADOS

A seguir são descritos os sistemas elétricos testes que foram utilizados nas simulações dos casos de falta para avaliar o desempenho das proteções baseadas em grandezas incrementais (TD) e ondas viajantes (OV ou TW).

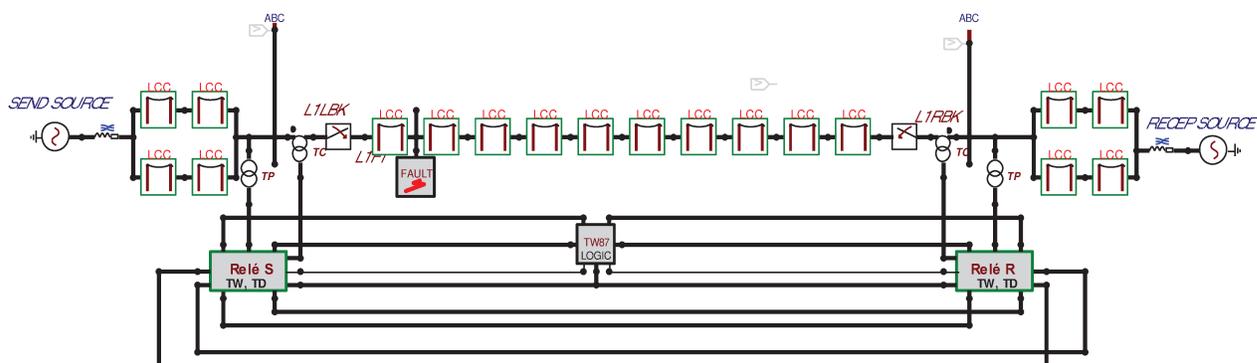


Figura A.1: Sistema Teste 01 em 525 kV implementado no ATPDRAW.

Figura A.1 representa o sistema teste 01 implementado no programa ATP usado para as simulações dos elementos baseados em grandezas incrementais (TD) e para as simulações do desempenho do esquema de disparo. A fim de tornar os resultados mais consistentes, todos os parâmetros do sistema elétrico utilizado foram baseados em parâmetros de sistemas reais. Adaptou-se a geometria da LT Araraquara – Bauru. Ilustra-se a geometria dos feixes dos condutores de fase e os condutores dos cabos para-raios, assim como as coordenadas da posição horizontal e a altura dos condutores na Figura A.2. São utilizados 4 sub-condutores por fase e dois cabos para-raios para uma torre de 36 m de altura, a qual opera com uma tensão nominal de 525 kV. Os parâmetros da linha foram obtidos através da execução da rotina *Line Constants* do programa ATP, onde foi considerada a geometria apresentada na Figura A.2 e especificações técnicas da Tabela A.1.

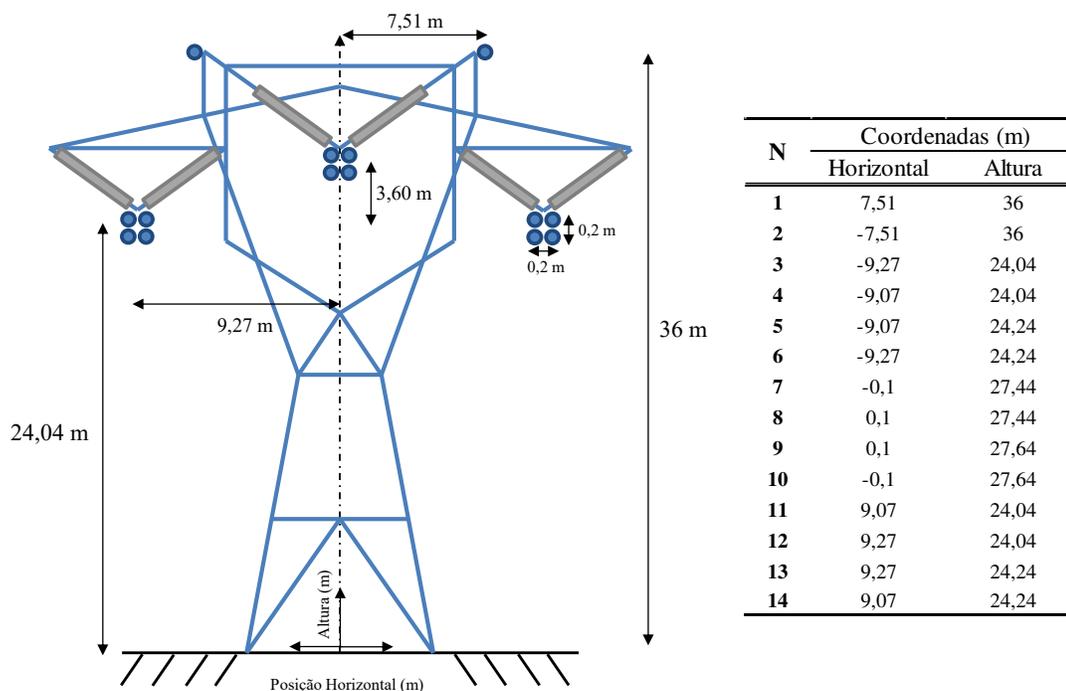


Figura A.2: Geometria da linha de transmissão e suas coordenadas em metros utilizada nas simulações - Altura média.

Tabela A.1: Características dos condutores da linha de transmissão de 525 kV

Linha de Transmissão		
Parâmetros	Condutores por Fase	Cabo Para - raio
Tipo	Cabo Grosbeak	EHS 3/8"
Nº de condutores em feixe	4	1
Resistência DC [Ω /km]	0,089898	4,188
Raio externo [mm]	12,57	4,572
Raio interno [mm]	4,635	-
Permeabilidade magnética relativa	1	70
Flecha a meio vão [m]	13,43	6,4
Temperatura [$^{\circ}$ C]	75	45
Resistividade do Solo [Ω .m]	50	
Comprimento da Linha [km]	220	

Os parâmetros da linha de transmissão podem ser vistos na Tabela A.2. A linha foi modelada como perfeitamente transposta. O arquivo ATP com a rotina *Line Constant* utilizado nas simulações é apresentado no Quadro A.1.

Tabela A.2: Parâmetros da linha de transmissão em 525 kV a 60 Hz

Linha de Transmissão					
Impedâncias e Admitâncias					
Sequência Zero			Sequência Positiva		
Ro	Xo	Bo	R1	X1	B1
[Ω/km]	[Ω/km]	[μS/km]	[Ω/km]	[Ω/km]	[μS/km]
0,270	1,189	2,886	0,028	0,358	4,578
Parâmetros Eletromagnéticos de Sequência Positiva					
Zc [Ω]			279,919 - j8,91		
Pc [MVA]			984,161		
v [km/s]			294.190		

Quadro A.1: Entrada para Rotina Line Constants do ATP

```

BEGIN NEW DATA CASE
LINE CONSTANTS
METRIC
C
C CALCULO DE PARÂMETROS DA LT 525 KV - 220 KM
C
C      1      2      3      4      5      6      7
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C dados do condutor
C f   p   r           d   h   t   v   s
C a   e   e           i   o   o   a   e
C s   l   s           cm a m r m r m o cm p
C e<---i<-----i           <-----m<-----i<-----v<-----v<-----a<-----a
0 .5  4.1880  4           0.9144  7.51  36.  29.6
0 .5  4.1880  4           0.9144 -7.51  36.  29.6
1.3156 .089898 4           2.514  -9.27  24.04  10.61
1.3156 .089898 4           2.514  -9.07  24.04  10.61
1.3156 .089898 4           2.514  -9.07  24.24  10.81
1.3156 .089898 4           2.514  -9.27  24.24  10.81
2.3156 .089898 4           2.514   -0.1  27.44  14.01
2.3156 .089898 4           2.514   0.1  27.44  14.01
2.3156 .089898 4           2.514   0.1  27.64  14.21
2.3156 .089898 4           2.514  -0.1  27.64  14.21
3.3156 .089898 4           2.514   9.07  24.04  10.61
3.3156 .089898 4           2.514   9.27  24.04  10.61
3.3156 .089898 4           2.514   9.27  24.24  10.81
3.3156 .089898 4           2.514   9.07  24.24  10.81
BLANK card ending conductor cards within "LINE CONSTANTS" data
C      1      2      3      4      5      6
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C cartao de frequencia
C      f           c   I   I I           I
C ohm-mr   Hz   r           a   C   Z C           S
C      s           e           r   P   P A           E
C -----l<-----g<-----s <-----R <-----R P           G
50.      60.00      1 111111 111111 1
BLANK card ending frequency cards of "LINE CONSTANTS" data
BLANK card ending "LINE CONSTANTS" data cases
BLANK card ending data cases
    
```

Figura A.3 representa o sistema teste 02 em 230 kV implementado no programa ATP, usado para as simulações dos elementos baseados em ondas viajantes (OV ou TW). Na Tabela A.3 são apresentadas as impedâncias de sequência zero e positiva das fontes equivalentes S1 e S3.

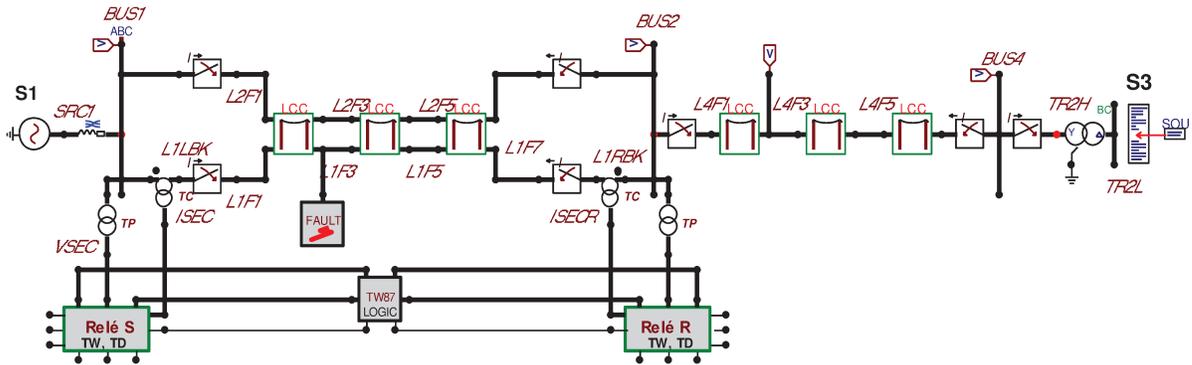


Figura A.3: Sistema teste 02 em 230 kV implementado no ATP (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2004)

Tabela A.3: Impedâncias da Fonte S1 e S3

Impedância	Fontes	
	S1 [230 kV]	S3 [230 kV]
Z1 [Ω]	6,1 + j16,7	0,69 + j4,12
Z0 [Ω]	2,7 + j8,37	0,34 + j4,77

No Quadro A.2 é apresentado o modelo do cartão da máquina síncrona S3 implementado no ATP (*Tipo 59*) conectada à barra 4 (Bus 4) através de um transformador estrela aterrado–delta. Os parâmetros mais importantes do transformador são apresentados na Tabela A.4.

Quadro A.2: Modelo do Cartão da máquina síncrona S3 (Type 59 S.M.)

```

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C <BUS > < VOLTS ><  FREQ >< ANGLE > Balanced Set
59TR2LA  18616.122      60.0      30.0
59TR2LB
59TR2LC
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C      < EPSUBA >< EMPMEG >< EPOGEL >      < NIOMAX >
TOLERANCES      200.      20
C      1      2      3
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C      < FM >
PARAMETER FITTING      1.0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C KMKE NP< SMOUTP >< SMOUTQ >< RMVA >< RKV >< AGLINE >< S1 >< S2 >
  1 1 1 2      1.      1.      830.      24.      600.0      600.0      720.0
BLANK
      .00199      .15      1.89      1.8      .23      .435      .1775      .177
      4.2      .589      .031      .063      .16
  1      1.0      .678      1.
BLANK
BLANK
FINISH

```

Tabela A.4: Parâmetros mais ressaltantes do Transformador TR2H

Parâmetros	Alta Tensão	Baixa Tensão
Tensão [kV]	229,893	22,8
Potência [MVA]	725	-
Reatância [pu]	0,0921	-
Resistência [Ω]	0,1469	0,0044

Com respeito às linhas de transmissão, a linha conectada entre os barramentos *Bus1* e *Bus2* é de circuito duplo; a segunda linha conectada entre os barramentos *Bus2* e *Bus4* é de circuito simples. Cada linha possui 72 km de comprimento e é dividida em três trechos, cada um de 24 km. Isto permitiu aplicar faltas em cada nó gerado. As linhas foram representadas com o modelo JMarti que considera a dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência e está disponível no programa ATP. O condutor da linha é *Marigold 1113 Kcmil AA* com um diâmetro de 30,884 mm e uma resistência CC de 0,0576 Ω /km a 50°C. Os parâmetros da linha são calculados com uma resistividade de solo de 50 Ω .m. Na Tabela A.5 é apresentada a geometria de torres das LTs em 230 kV.

Tabela A.5: Geometria de torres das linhas de transmissão em 230 kV

Geometria da Torre em 230 kV do circuito duplo			
N	Coordenadas (m)		
	Horizontal	Altura	Altura a meio vão
1	0,0	30,5	22,3
2	0,0	25,5	17,2
3	0,0	20,4	12,2
4	8,8	20,4	12,2
5	8,8	25,5	17,2
6	8,8	30,5	22,3

Geometria da Torre em 230 kV do circuito simples			
N	Coordenadas (m)		
	Horizontal	Altura	Altura a meio vão
1	0,0	30,5	22,3
2	0,0	25,5	17,2
3	0,0	20,4	12,2

O modelo do Transformador Potencial Capacitivo (TPC) usado na simulação pontual 12 é apresentado na Figura A.4. São incluídos o circuito divisor capacitivo (C1, C2), o reator de compensação (Lle, Rle), o modelo do transformador potencial indutivo com suas impedâncias primárias (Lpe, Rpe) e secundárias (Lse, Rse) e com uma relação de transformação de 'n', o circuito supressor ferroressonância (CSF) com parâmetros (Rcf, Cf, Rlf, Lf e Rf) e o burden ou carga secundária (Ro, Rlo e Lo). Os parâmetros e o modelo usado são obtidos da referência (PAJUELO; RAMAKRISHNA; SACHDEV, 2007). Na Tabela A.6 são mostrados os valores de cada componente que faz parte do TPC.

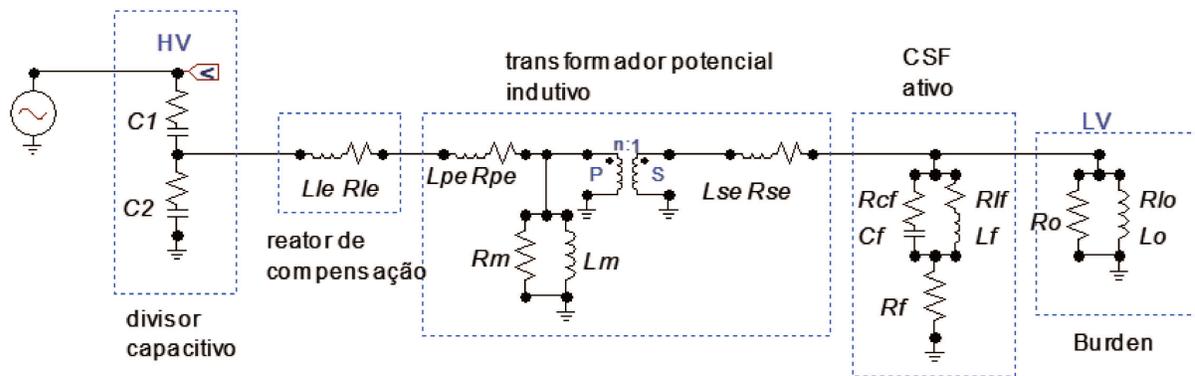


Figura A.4: Circuito Transformador Potencial Capacitivo implementado no ATP

Tabela A.6: Parâmetros do TPC de 525 kV

Parâmetros do TPC de 525 kV					
R ₂ [Ω]	59,03	R _{PE} [Ω]	850,02	R _{CF} [Ω]	0,08
C ₂ [nF]	89,991	L _{PE} [mH]	4443,3	C _F [μ F]	165,36
R ₁ [Ω]	3310,70	R _{SE} [Ω]	0,25	R _{LF} [Ω]	1,2301
C ₁ [nF]	1,61	L _{SE} [mH]	0,65	L _F [mH]	54,3
R _{LE} [Ω]	950,06	n	75,85	R _O [Ω]	29,551
L _{LE} [mH]	67922	R _F [Ω]	13,333	L _{LO} [mH]	98,2

Com o intuito de analisar o comportamento transitório do TPC, é representado na Figura A.5 a curva de resposta em frequência em magnitude e ângulo. Pode-se observar que o comportamento típico de um TPC é de manter um ganho unitário a frequências próximas da fundamental (neste caso 60 Hz), ilustrando-se um comportamento quase linear, com amplificação de frequências indesejadas ligeiramente acima e abaixo da fundamental, e uma alta atenuação para altas frequências. Por outro lado, também é apresentado no gráfico um grupo de curvas de resposta em frequência considerando três capacitâncias parasitas em paralelo arbitrárias diferentes (1pF, 100pF e 500 pF) com o reator de compensação, com o objetivo de mostrar a sua importância para medição de sinais nas altas frequências, amplificando a magnitude e reproduzindo assim alguns transitórios no lado secundário do TPC. Além disso, é importante mencionar que seu valor depende do projeto de TPC.

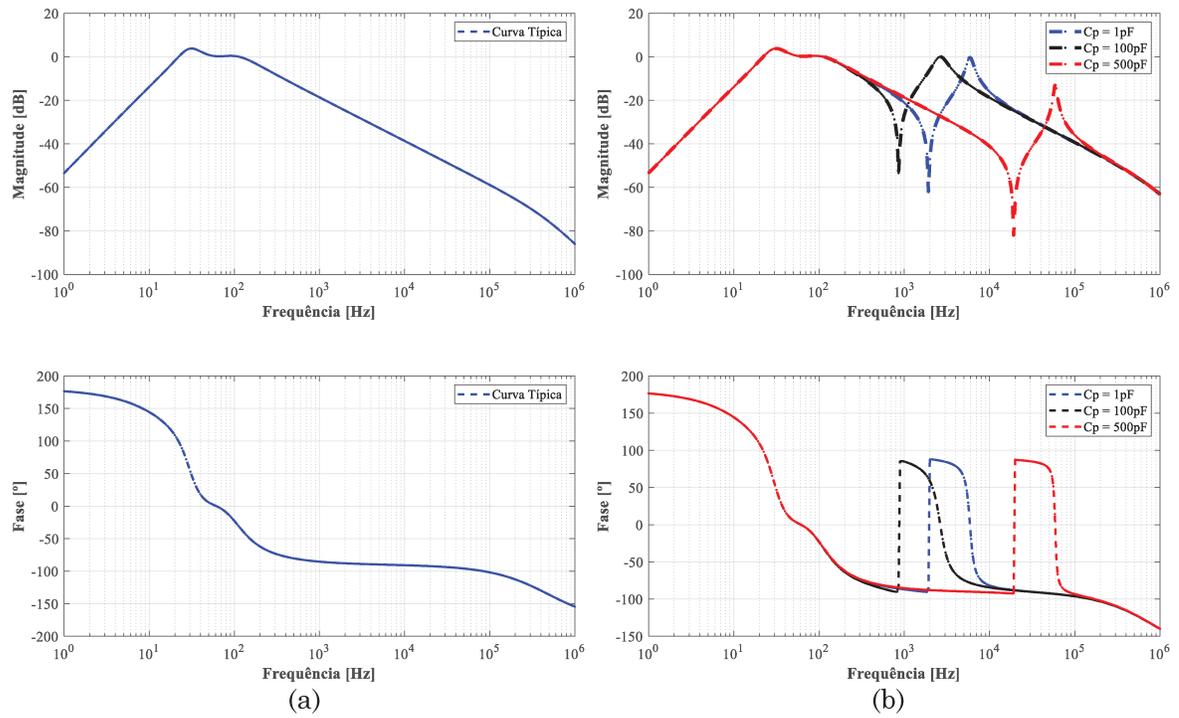


Figura A.5: Resposta em frequência do TPC: (a) curva típica e (b) grupo de curvas considerando uma capacitância parasita arbitrária em paralelo com o reator de compensação.

APÊNDICE B

CÓDIGOS MODELS ELABORADOS

Neste apêndice são fornecidos alguns códigos MODELS dos blocos do relé digital no domínio do tempo implementados no programa ATP.

Quadro B.1: Filtro DS para extração das TWs por fase

```

MODEL FILTRO_DS
INPUT
  XI  -- ENTRADA DE CORRENTE

CONST
  a {val:1}
  b {val:-1}
  N {val:20}
  NDS {val:20}  -- NUMERO DE COEFICIENTES
  G {val:0.1}  -- GANHO PARA UMA SAÍDA UNITARIA

VAR
  BUFFI[1..20]  -- JANELA DESLIZANTE

INIT
  BUFFI[1..20]:= 0
ENDINIT

OUTPUT
  TWI

HISTORY
  TWIA {dflt:0}
  DELAY CELLS DFLT:50
  Timestep MIN: 1E-6

EXEC
  DSFILTER[1..10]:= -0.1
  DSFILTER[11..20]:= 0.1

  FOR i:=2 TO 20 DO
    BUFFI[i-1]:= BUFFI[i]
  ENDFOR
  BUFFI[20]:= XIA
  TWIA:= 0
  FOR i:= 1 TO 20 DO
    TWI:= TWI + BUFFI[i]*DSFILTER[i]
  ENDFOR
ENDEXEC

ENDMODEL

```

Quadro B.2: Lógica do Transmissor Chave – Esquema POTT

```

MODEL TRANSMITTER_LOGIC
INPUT
  TW32FP[1..3]           -- VETOR DE BITS POR FASE DO ELEMENTO TW32F
  TD32FP[1..3]           -- VETOR DE BITS POR FASE DO ELEMENTO TD32F
  TD32RP[1..3]           -- VETOR DE BITS POR FASE DO ELEMENTO TW32R

DATA
  TDRBP {dflt:5E-3}      -- MINIMO PERIODO DE TEMPO
  TDRBD {dflt:80E-3}     -- PERIODO EXTRA DE TEMPO

VAR
  KEY[1..3]              -- VETOR DE BITS POR FASE DO SINAL CHAVE
  KEYA,KEYB,KEYC         -- BITS POR FASE DO SINAL CHAVE
  RA, RB, RC             -- CONTADOR AUXILIAR
  TDRBA,TDRBB,TDRBC     -- MINIMO PERIODO DE TEMPO POR FASE
  TW32FA, TW32FB, TW32FC -- BITS POR FASE DO ELEMENTO TW32F
  TD32FA, TD32FB, TD32FC -- BITS POR FASE DO ELEMENTO TD32F
  TD32RA, TD32RB, TD32RC -- BITS POR FASE DO ELEMENTO TD32R

OUTPUT
  KEY[1..3]

INIT
  KEYA:= 0
  KEYB:= 0
  KEYC:= 0
  KEY[1..3]:=0
  RA:= 0, RB:= 0, RC:= 0
  TDRBA:= 0,TDRBB:= 0,TDRBC:= 0
  TW32FA:= TW32FP[1]
  TW32FB:= TW32FP[2]
  TW32FC:= TW32FP[3]

  TD32FA:= TD32FP[1]
  TD32FB:= TD32FP[2]
  TD32FC:= TD32FP[3]

  TD32RA:= TD32RP[1]
  TD32RB:= TD32RP[2]
  TD32RC:= TD32RP[3]

ENDINIT
  TIMESTEP MIN: 0.1E-3

EXEC
  TW32FA:= TW32FP[1]
  TW32FB:= TW32FP[2]
  TW32FC:= TW32FP[3]

  TD32FA:= TD32FP[1]
  TD32FB:= TD32FP[2]
  TD32FC:= TD32FP[3]

  TD32RA:= TD32RP[1]
  TD32RB:= TD32RP[2]
  TD32RC:= TD32RP[3]

```

```
IF TD32RA=1 THEN
  RA:= RA+ 1
ENDIF
IF RA*TIMESTEP>TDRBP AND RA*TIMESTEP<TDRBD THEN
  TDRBA:= 1
ENDIF

IF TD32RB=1 THEN
  RB:= RB+ 1
ENDIF
IF RB*TIMESTEP>TDRBP AND RB*TIMESTEP<TDRBD THEN
  TDRBB:= 1
ENDIF

IF TD32RC=1 THEN
  RC:= RC+ 1
ENDIF
IF RC*TIMESTEP>TDRBP AND RC*TIMESTEP<TDRBD THEN
  TDRBC:= 1
ENDIF

IF NOR(TD32RA,TDRBA) THEN
  IF TW32FA= 1 OR TD32FA= 1 THEN
    KEYA:= 1
  ENDIF
ENDIF

IF NOR(TD32RB,TDRBB) THEN
  IF TW32FB= 1 OR TD32FB= 1 THEN
    KEYB:= 1
  ENDIF
ENDIF

IF NOR(TD32RC,TDRBC) THEN
  IF TW32FC= 1 OR TD32FC= 1 THEN
    KEYC:= 1
  ENDIF
ENDIF

KEY[1]:= KEYA
KEY[2]:= KEYB
KEY[3]:= KEYC

ENDEXEC
ENDMODEL
```

Quadro B.3: Lógica do Transmissor Chave – Esquema POTT

```

MODEL TRANSMITTER_LOGIC
INPUT
  TW32FP[1..3]           -- VETOR DE BITS POR FASE DO ELEMENTO TW32F
  TD32FP[1..3]           -- VETOR DE BITS POR FASE DO ELEMENTO TD32F
  TD32RP[1..3]           -- VETOR DE BITS POR FASE DO ELEMENTO TW32R

DATA
  TDRBP {dflt:5E-3}      -- MINIMO PERIODO DE TEMPO
  TDRBD {dflt:80E-3}     -- PERIODO EXTRA DE TEMPO

VAR
  KEY[1..3]              -- VETOR DE BITS POR FASE DO SINAL CHAVE
  KEYA,KEYB,KEYC         -- BITS POR FASE DO SINAL CHAVE
  RA, RB, RC              -- CONTADOR AUXILIAR
  TDRBA,TDRBB,TDRBC     -- MINIMO PERIODO DE TEMPO POR FASE
  TW32FA, TW32FB, TW32FC -- BITS POR FASE DO ELEMENTO TW32F
  TD32FA, TD32FB, TD32FC -- BITS POR FASE DO ELEMENTO TD32F
  TD32RA, TD32RB, TD32RC -- BITS POR FASE DO ELEMENTO TD32R

OUTPUT
  KEY[1..3]

INIT
  KEYA:= 0
  KEYB:= 0
  KEYC:= 0
  KEY[1..3]:=0
  RA:= 0, RB:= 0, RC:= 0
  TDRBA:= 0,TDRBB:= 0,TDRBC:= 0
  TW32FA:= TW32FP[1]
  TW32FB:= TW32FP[2]
  TW32FC:= TW32FP[3]

  TD32FA:= TD32FP[1]
  TD32FB:= TD32FP[2]
  TD32FC:= TD32FP[3]

  TD32RA:= TD32RP[1]
  TD32RB:= TD32RP[2]
  TD32RC:= TD32RP[3]

ENDINIT
  TIMESTEP MIN: 0.1E-3

EXEC
  TW32FA:= TW32FP[1]
  TW32FB:= TW32FP[2]
  TW32FC:= TW32FP[3]

  TD32FA:= TD32FP[1]
  TD32FB:= TD32FP[2]
  TD32FC:= TD32FP[3]

  TD32RA:= TD32RP[1]
  TD32RB:= TD32RP[2]
  TD32RC:= TD32RP[3]

```

```
IF TD32RA=1 THEN
  RA:= RA+ 1
ENDIF
IF RA*TIMESTEP>TDRBP AND RA*TIMESTEP<TDRBD THEN
  TDRBA:= 1
ENDIF

IF TD32RB=1 THEN
  RB:= RB+ 1
ENDIF
IF RB*TIMESTEP>TDRBP AND RB*TIMESTEP<TDRBD THEN
  TDRBB:= 1
ENDIF

IF TD32RC=1 THEN
  RC:= RC+ 1
ENDIF
IF RC*TIMESTEP>TDRBP AND RC*TIMESTEP<TDRBD THEN
  TDRBC:= 1
ENDIF

IF NOR(TD32RA,TDRBA) THEN
  IF TW32FA= 1 OR TD32FA= 1 THEN
    KEYA:= 1
  ENDIF
ENDIF

IF NOR(TD32RB,TDRBB) THEN
  IF TW32FB= 1 OR TD32FB= 1 THEN
    KEYB:= 1
  ENDIF
ENDIF

IF NOR(TD32RC,TDRBC) THEN
  IF TW32FC= 1 OR TD32FC= 1 THEN
    KEYC:= 1
  ENDIF
ENDIF

KEY[1]:= KEYA
KEY[2]:= KEYB
KEY[3]:= KEYC

ENDEXEC
ENDMODEL
```