



**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE FUNÇÕES DE PROTEÇÃO
NO DOMÍNIO DO TEMPO DISPONÍVEIS NO RELÉ SEL-T400L**

JOÃO PAULO GOMES RIBEIRO

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE FUNÇÕES DE PROTEÇÃO
NO DOMÍNIO DO TEMPO DISPONÍVEIS NO RELÉ SEL-T400L**

JOÃO PAULO GOMES RIBEIRO

Trabalho final de graduação submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

APROVADA POR:

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Carlos Alberto de Miranda Aviz (Eletronorte)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, Maio de 2017.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e à Nossa Senhora de Fátima, por nunca terem me abandonado, sempre me dando forças para superar os obstáculos que apareceram ao longo dessa jornada.

À minha família, de modo especial, aos meus pais, Adão Paulo e Antônia, e ao meu irmão, João Victor, por todo o suporte, amor, carinho e confiança durante toda minha vida. Sem eles, este sonho não seria possível.

À Jéssyca, minha namorada e fiel companheira, pelo grandioso apoio, amor, carinho, paciência e confiança em mim depositada.

Ao meu orientador, Professor Felipe Lopes, por sempre ter acreditado em mim, por tanto ter me ajudado e muito ter me ensinado. Ao final desta jornada, posso dizer que, além de mestre, tornou-se um amigo.

Aos meus companheiros de UnB, LAPSE e ENETEC, pelos sofrimentos e alegrias compartilhadas. Sem dúvida, compartilhar este caminho com eles, tornou tudo mais prazeroso e engrandecedor.

A todos os professores com os quais tive a oportunidade de aprender e crescer como pessoa e profissional, de modo especial à professora Diana, minha primeira orientadora. Para sempre ficará marcada em minha vida.

À Universidade de Brasília, por contribuir com a formação social e profissional de seus alunos.

RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, uma nova tendência do mercado de proteção de linhas de transmissão: a proteção no domínio do tempo. As funções avaliadas estão presentes no primeiro relé microprocessado do mercado mundial a integrar unicamente proteções no domínio do tempo, fundamentadas na teoria das ondas viajantes e das grandezas incrementais — o relé SEL-T400L, fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*. Dentre as funções de proteção apresentadas, destacam-se quatro: duas funções direcionais de potência baseadas em grandezas incrementais e ondas viajantes, TD32 e TW32, respectivamente; uma função de distância baseada na teoria das grandezas incrementais, TD21; e, por fim, uma função diferencial de linhas baseada na teoria das ondas viajantes, TW87. Percebe-se, da literatura, que poucas são as referências que discorrem sobre a parametrização, o princípio de funcionamento e a implementação dessas funções. Assim sendo, este trabalho surge com o intuito de auxiliar os engenheiros eletricitistas da área de proteção quanto às novas funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, apresentando a implementação numérica e a parametrização dos ajustes essenciais dessas funções. A partir de diferentes cenários de falta simulados no *Alternative Transients Program* (ATP) e selecionados de forma a abranger características típicas de operação dos sistemas de transmissão reais, apresenta-se o funcionamento das proteções no domínio do tempo. Dos resultados, constata-se que as funções avaliadas são rápidas e seguras, especialmente para os casos mais adversos de falta, para os quais tempos de atuação típicos menores do que um quarto de ciclo da componente fundamental são obtidos, a depender da função empregada.

Palavras-chave: Faltas em linhas de transmissão; proteção no domínio do tempo; ondas viajantes; grandezas incrementais; T400L; transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

A new trend in the transmission line protection market is presented in this work: the time domain protection. The evaluated functions are embedded in the first relay in the world which integrates only time domain protection functions, based on traveling waves' theory and incremental quantities principle — the SEL-T400L relay, manufactured by *Schweitzer Engineering Laboratories*. Among the presented protection elements, four elements stand out: two directional elements based on incremental quantities and traveling waves principle, TD32 and TW32, respectively; an incremental quantity based distance element, TD21; and a traveling wave based differential element, TW87. In the literature, very few references regarding the T400L settings, operation principle and numerical implementation are found. Therefore, this work comes to give support for the electrical engineers interested in time-domain protection systems, indicating its main settings and implementation issues. In other to present the performance of the time domain protection elements, different fault scenarios are simulated using the *Alternative Transients Program* (ATP). The simulated cases were chosen in such a way to illustrate the protection behavior during typical operation conditions of transmission systems. From the obtained results, it can be seen that the evaluated functions are very fast and reliable, especially for the most severe faults. In fact, they can trip in a time smaller than a quarter of the fundamental cycle, depending on the protection element.

Keywords: Faults on transmission lines; time domain protection; traveling waves; incremental quantities; T400L; electromagnetic transients.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Glossário	xiv
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Objetivos do Trabalho	3
1.3 Organização do texto	4
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
Capítulo 3 – Fundamentação Teórica	11
3.1 Faltas em Sistemas de Transmissão	11
3.2 O Princípio da Superposição e as Grandezas Incrementais	12
3.3 Parâmetros Concentrados <i>versus</i> Parâmetros Distribuídos	14
3.3.1 Fenômeno de Propagação de OV's em Sistemas de Transmissão	16
3.3.2 Reflexão e Refração de OV's em Descontinuidades	20
Capítulo 4 – Funções de Proteção do Relé SEL-T400L	23
4.1 Estrutura Básica do T400L	23
4.2 Filtro DS	24
4.3 Funções de Proteção no Domínio do Tempo	28
4.3.1 <i>Time-Domain</i> 32 (TD32)	28
4.3.1.1 Princípio de Operação da TD32	29
4.3.1.2 Corrente Réplica Incremental	33

4.3.1.3	Considerações para Sistemas Trifásicos: os Loops de Falta . . .	35
4.3.1.4	Implementação das Lógicas da TD32	40
4.3.1.5	<i>Starting Element</i> , Supervisão por Sobrecorrente e Seleção de Fases	43
4.3.2	<i>Time-Domain</i> 21 (TD21)	45
4.3.2.1	O Princípio de Operação da TD21	46
4.3.2.2	Implementação das Lógicas de Operação e Restrição da TD21 .	49
4.3.3	<i>Traveling Wave</i> 32 (TW32)	52
4.3.3.1	Princípio de Funcionamento da TW32	52
4.3.3.2	Implementação da Lógica de Operação da TW32	54
4.3.4	<i>Traveling Wave</i> 87 (TW87)	55
4.3.4.1	Princípio de Operação da TW87	56
4.3.4.2	Implementação da Lógica de Operação da TW87	58
4.3.4.3	Seleção de Fases na TW87	62
4.4	Síntese do Capítulo e Resumo dos Ajustes do Relé SEL-T400L	63
Capítulo 5 – Simulações Computacionais e Parametrização do Relé SEL-T400L		66
5.1	Sistema Teste Simulado	66
5.2	Ajustes do Relé SEL-T400L	68
5.2.1	Ajustes da Supervisão por Sobrecorrente	68
5.2.2	Ajustes da Função TD32	73
5.2.3	Ajustes da Função TD21	75
5.2.4	Ajustes da Função TW87	76
5.3	Ajustes de Fábrica Adotados	79
Capítulo 6 – Resultados Obtidos		81
6.1	Análise Transitória de Curto-Circuito 1 — ATC 1	82
6.2	Análise Transitória de Curto-Circuito 2 — ATC 2	86
6.3	Análise Transitória de Curto-Circuito 3 — ATC 3	87
6.4	Análise Transitória de Curto-Circuito 4 — ATC 4	89
6.5	Análise Transitória de Curto-Circuito 5 — ATC 5	90
Capítulo 7 – Conclusões		94
Referências Bibliográficas		97

LISTA DE FIGURAS

3.1	Aplicação do princípio da superposição para análise de curto-circuito.	13
3.2	Sinais de corrente para um rede elétrica resistiva: (a) Corrente de carga; (b) Corrente de falta; (c) Corrente total; (d) Grandeza incremental de corrente para diferentes valores de p	15
3.3	Propagação de ondas viajantes quando da ocorrência de uma falta (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2013).	16
3.4	Modelo de LT a parâmetros distribuídos: (a) Segmento de comprimento Δx ; (b) Completo de uma linha de comprimento l	17
3.5	Ondas progressivas e regressivas (LOPES, 2014b).	19
3.6	OVs incidentes, refletidas e refratadas para uma falta em uma LT (LOPES, 2014b).	21
4.1	Aquisição de dados dos algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo.	23
4.2	Filtro DS: (a) Diagrama de blocos; (b) Janela de dados.	25
4.3	Resposta do filtro DS para diferentes sinais de entrada: (a) Degrau; (b) Rampa.	26
4.4	Operação de extração das ondas viajantes de corrente a partir do filtro DS.	26
4.5	Resposta em frequência do filtro DS para diferentes taxas de amostragem.	27
4.6	Efeito de N_{DS} nas ondas viajantes extraídas.	28
4.7	Circuito puro de falta e as relações entre tensão e corrente incrementais para uma falta: (a) interna e (b) externa.	29
4.8	Relações entre tensões e correntes incrementais para faltas internas (a) e externas (b).	30
4.9	T_{OP} , T_{FWD} e T_{REV} para uma falta: (a) interna (b) externa.	32

4.10	Correntes incremental e réplica incremental.	34
4.11	Grandezas incrementais para uma falta reversa: (a)Tensão e corrente incrementais e (b)Tensão incremental e corrente réplica incremental.	35
4.12	$T_{OP}(t)$ obtido a partir do negativo do produto entre tensão incremental e: (a) Corrente incremental e (b) Corrente réplica incremental, para falta interna; (c) Corrente incremental e (d) Corrente réplica incremental, para falta externa.	36
4.13	Componentes de sequência para: (a)Falta AT e (b)Falta BC.	37
4.14	Cálculos das grandezas incrementais de corrente (a) e tensão (b) utilizadas na TD32.	40
4.15	Cálculo dos torques da TD32.	41
4.16	Lógica de operação da TD32.	42
4.17	Acionamento de disjuntor (<i>trip</i>) a partir da TD32.	42
4.18	Lógica do <i>Starting Element</i> (SEL, 2016).	43
4.19	Seleção de Fases: variação de tensão dos loops de falta para uma falta AT franca.	44
4.20	Princípio de funcionamento da supervisão por sobrecorrente.	45
4.21	Sistema monofásico (a), circuito puro de falta (b) e o perfil de tensão (c) para faltas aplicadas na LT.	47
4.22	Cálculo dos sinais de corrente (a) e tensão (b) utilizados na TD21.	49
4.23	Tensão de restrição da TD21: (a) Diagrama de blocos para o cálculo de V_{21RST} ; (b) Exemplo de cálculo de V_{21RST}	50
4.24	Lógica de operação da TD21.	51
4.25	Polaridade das ondas viajantes para: (a) Falta Interna à LT e (b) Falta Externa à LT.	53
4.26	Lógica de operação da TW32.	54
4.27	Esquema POTT do T400L.	55
4.28	Princípio de operação da TW87 para faltas internas (a) e externas (b).	57
4.29	Definindo os instantes de entrada e saída das OV's de corrente na LT monitorada.	59

4.30	Lógica de operação da TW87.	61
4.31	Padrão de magnitude e polaridade de i_{FASE} para uma falta monofásica AT (a) e para uma bifásica do tipo AB (b).	63
5.1	Sistema elétrico de potência utilizado para testes e parametrização das funções de proteção no domínio do tempo.	67
5.2	Aplicação de curto-circuito para determinação dos ajustes de sobrecorrente da TD32 para o relé do terminal local.	69
5.3	Componentes de sequência para: (a) Falta AT e (b) Falta BC.	71
5.4	Validação do procedimento de ajuste dos parâmetros de sobrecorrente do esquema POTT.	74
5.5	Energização da linha de transmissão.	76
5.6	Correntes de fase capturadas durante a energização da LT.	77
5.7	Componente alfa de Clarke obtida das OV's de corrente da fase A.	78
6.1	Locais de aplicação de falta para análise de desempenho das funções de proteção avaliadas.	82
6.2	ATC 1a — OV's de tensão e corrente, torque integrado e <i>word-bits</i> de operação da TW32 para: (a) relé do terminal local e (b) relé do terminal remoto da LT.	83
6.3	ATC 1a — Torques de operação e restrição, torques integrados e <i>word-bits</i> de operação da TD32 para: (a) relé do terminal local e (b) relé do terminal remoto da LT.	84
6.4	ATC 1a — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e <i>word-bits</i> de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.	85
6.5	ATC 1 — OV's de corrente e <i>word-bits</i> de operação por fase da TW87.	86
6.6	ATC 1b — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e <i>word-bits</i> de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.	87
6.7	ATC 2 — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e <i>word-bits</i> de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.	88

6.8	Energia nos primeiros instantes de falta para diferentes ângulos de incidência de falta.	89
6.9	ATC 3 — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e <i>word-bits</i> de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.	89
6.10	ATC 5 — OVs de tensão e corrente, torque integrado e <i>word-bits</i> de operação da TW32 para: (a) fase A do relé do terminal local, (b) fase A do relé do terminal remoto da LT , (c) fase B do relé do terminal local e (d) fase B do relé do terminal remoto.	90
6.11	ATC 5 — Torques de operação e restrição, torques integrados e <i>word-bits</i> de operação da TD32 para: (a) relé do terminal local e (b) relé do terminal remoto da LT.	91
6.12	ATC 5 — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e <i>word-bits</i> de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.	92
6.13	ATC 5 — OVs de corrente e <i>word-bits</i> de operação por fase da TW87.	93

LISTA DE TABELAS

4.1	Loop de tensões e correntes incrementais no domínio do tempo	39
4.2	Ajustes definidos em fábrica.	64
4.3	Ajustes de campo do relé no domínio do tempo(KASZTENNY <i>et al.</i> , 2016). . .	65
5.1	Loop de tensões e correntes incrementais no domínio da frequência	69
5.2	Ajustes de fábrica utilizados.	80
6.1	Tempo de atuação das proteções para cada um dos ATCs analisados.	82

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Operador matemático complexo usado na transformação entre componentes de fase e de sequência.
E_{op}	Energia de operação.
E_{FWD}	Energia de restrição para defeitos diretos.
E_{REV}	Energia de restrição para defeitos reversos.
E_{TW32}	Torque integrado da TW32.
E_{21}	Energia de operação da TD21.
$EXTSC$	Variável de controle da presença de capacitor na linha.
f_s	Frequência de amostragem.
f_{IZ}	Função para cálculo da corrente réplica.
G	Ganho do filtro DS.
$I(x, s)$	Solução geral para a onda viajante de corrente.
I_i	Onda viajante de corrente incidente.
I_r	Onda viajante de corrente refletida.
I_m	Onda viajante de corrente medida.
i_ϕ	Corrente instantânea de fase.
$i_{TW\phi}$	Onda viajante de corrente por fase.
i_Z	Corrente réplica.
i_{TW}	Onda viajante de corrente.
i_{TWL}	Onda viajante de corrente para o terminal local da linha.

i_{TWR}	Onda viajante de corrente para o terminal remoto da linha.
i_{DIF}	Variável de operação da função diferencial TW87.
i_{RST}	Variável de restrição da função diferencial TW87.
IL	Magnitude da primeira onda viajante detectada no terminal local da linha.
IR	Magnitude da primeira onda viajante detectada no terminal remoto da linha.
i_{TW32_MIN}	Nível mínimo de corrente da TW32.
\hat{I}_{AT}	Fasor da corrente de loop para uma falta fase-terra AT.
\hat{I}_{ZAT}	Fasor da corrente réplica de loop para uma falta fase-terra AT.
\hat{I}_{BC}	Fasor da corrente de loop para uma falta fase-fase BC.
\hat{I}_{ZBC}	Fasor da corrente réplica de loop para uma falta fase-fase BC.
\hat{I}_0	Fasor da corrente de sequência zero.
\hat{I}_{0_relay}	Fasor da corrente de sequência zero no local do relé.
\hat{I}_1	Fasor da corrente de sequência positiva.
\hat{I}_{1_relay}	Fasor da corrente de sequência positiva no local do relé.
\hat{I}_2	Fasor da corrente de sequência negativa.
\hat{I}_{2_relay}	Fasor da corrente de sequência negativa no local do relé.
\hat{I}_A	Fasor da corrente da Fase A.
\hat{I}_{A_relay}	Fasor da corrente da Fase A no local do relé.
\hat{I}_B	Fasor da corrente da Fase B.
\hat{I}_{B_relay}	Fasor da corrente da Fase B no local do relé.
\hat{I}_C	Fasor da corrente da Fase C.
\hat{I}_{C_relay}	Fasor da corrente da Fase C no local do relé.
K	Fator de ajuste de sensibilidade da TW87.

L_0	Indutância de sequência zero.
L_1	Indutância de sequência positiva.
m_0	Ponto de alcance do elemento de distância.
m_{87}	Variável de localização de faltas da TW87.
MS_{TW32}	Margem de segurança da TW32.
MS_{TD32}	Margem de segurança da TD32.
MS_{TD21}	Margem de segurança da TD21.
N_{DS}	Número de amostras contidas em uma da janela do filtro DS.
NL_{PRI}	Amostra associada ao instante de chegada da primeira onda viajante de corrente no terminal local da linha.
NR_{PRI}	Amostra associada ao instante de chegada da primeira onda viajante de corrente no terminal remoto da linha.
NL_{SAI}	Amostra associada ao instante de saída onda viajante de corrente no terminal local da linha.
NR_{SAI}	Amostra associada ao instante de saída onda viajante de corrente no terminal remoto da linha.
p	Número de ciclos que determina a duração da grandeza incremental.
P	Nível mínimo de pickup.
R_F	Resistência de falta.
R_0	Resistência de sequência zero.
R_1	Resistência de sequência positiva.
S	<i>Slope</i> da função diferencial.
T	Período fundamental da grandeza incremental.
T_{DS}	Tempo de duração da janela do filtro DS.
T_{op}	Torque de operação.
T_{FWD}	Torque de restrição para defeitos diretos.
T_{REV}	Torque de restrição para defeitos reversos.

$TD32_{FWD}$	<i>Word-bit</i> referente ao sinal permissivo de <i>trip</i> da TD32.
$TD32_{REV}$	<i>Word-bit</i> referente ao sinal de bloqueio de <i>trip</i> da TD32.
T_{32OP}	Torque de operação da TW32.
$T_{32OP,min}$	Torque de operação mínimo da TW32.
$TW32_{FWD}$	<i>Word-bit</i> referente ao sinal permissivo de <i>trip</i> da TW32.
$TD21$	<i>Word-bit</i> de operação da TD21.
$TW87$	<i>Word-bit</i> de operação da TW87.
$T1$	Tempo de verificação do torque de operação da TW32.
$T2$	Tempo de reforço inicial da TD32.
$TD32ZF$	Impedância de ajuste para defeitos diretos.
$TD32ZR$	Impedância de ajuste para defeitos reversos.
$TD21MP$	Alcance da TD21 para os loops de falta bifásicos.
$TD21MG$	Alcance da TD21 para os loops de falta monofásicos.
$TWLPT$	Ajuste de tempo de trânsito da linha.
$TP50P$	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta bifásicos da TW87.
$TP50G$	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta monofásicos da TW87.
$TP67P$	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta bifásicos da TD21 e do esquema <i>POTT</i> .
$TP67G$	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta monofásicos da TD21 e do esquema <i>POTT</i> .
$TWLPT_{aprox}$	Tempo de trânsito da linha aproximado.
$V(x, s)$	Solução geral para a onda viajante de tensão.
V_i	Onda viajante de tensão incidente.
V_r	Onda viajante de tensão refletida.
V_m	Onda viajante de tensão medida.

v_ϕ	Tensão instantânea de fase.
$v_{TW\phi}$	Onda viajante de tensão por fase.
v_F	Tensão no ponto de falta.
v_{START_LIM}	Valor mínimo de variação de tensão.
V_{21OP}	Tensão de operação da TD21.
V_{OP}	Tensão de operação.
V_{21R}	Sinal de restrição.
V_{21RST}	Tensão de restrição da TD21.
V_{RST}	Tensão de restrição.
v_{TW}	Onda viajante de tensão.
v_{TW32_MIN}	Nível mínimo de tensão da TW32.
V_{MIN}	Limiar mínimo de restrição da TD21.
\widehat{V}_A	Fasor da tensão na fase A.
\widehat{V}_B	Fasor da tensão na fase B.
\widehat{V}_C	Fasor da tensão na fase C.
\widehat{V}_{BC}	Fasor de tensão de loop para uma falta fase-fase BC.
\widehat{V}_C	Fasor da tensão na fase C.
\widehat{V}_0	Fasor da tensão de sequência zero.
\widehat{V}_1	Fasor da tensão de sequência positiva.
\widehat{V}_2	Fasor da tensão de sequência negativa.
XC	Reatância do banco de capacitores interno à linha.
Z_c	Impedância característica da linha.
Z_s	Impedância de surto da linha.
Z_t	Impedância de terminação.

Z_L	Impedância do equivalente de Thévenin local.
Z_R	Impedância do equivalente de Thévenin remoto.
Z_{LT}	Impedância da linha.
$Z_{LT,0}$	Impedância de sequência zero da linha.
$Z_{LT,1}$	Impedância de sequência positiva da linha.
Z_{FWD}	Impedância de ajuste para defeitos diretos.
Z_{REV}	Impedância de ajuste para defeitos reversos.
Z_0	Impedância de sequência zero.
Z_1	Impedância de sequência positiva.
Z_2	Impedância de sequência negativa.
Δs	Grandeza incremental instantânea para a variável s .
Δt	Período de amostragem.
Δ_{MIN}	Valor de limiar mínimo.
$\Delta \tau$	Variação do tempo de trânsito da linha.
δ	Ângulo de carregamento.
γ	Constante de propagação da onda.
$\Gamma_{(V)r}$	Coefficiente de reflexão da onda viajante de tensão.
$\Gamma_{(V)t}$	Coefficiente de refração da onda viajante de tensão.
$\Gamma_{(I)r}$	Coefficiente de reflexão da onda viajante de corrente.
$\Gamma_{(I)t}$	Coefficiente de refração da onda viajante de corrente.
τ	Tempo de trânsito da linha.
$\tau_{amostras}$	Número de amostras equivale ao tempo de trânsito da linha.
θ	Ângulo de incidência de falta.

GLOSSÁRIO

ADC	Conversor Analógico-Digital.
ATC	Análise Transitória de Curto-Circuito.
ATP	<i>Alternative Transients Program.</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration.</i>
DTT	<i>Direct Transfer Trip.</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
Filtro DS	Filtro <i>Differentiator-Smoother.</i>
LPF	Filtro passa-baixa.
LT	Linha de Transmissão.
MS	Margem de Segurança.
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
OV	Onda Viajante.
POTT	<i>Permissive Overreach Transfer Trip.</i>
SEE	Sistema de Energia Elétrica.
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories.</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional.
SIR	<i>Source Impedance Ratio.</i>
T400L	Relé microprocessado baseado no domínio do tempo.
TC	Transformador de corrente.
TD21	<i>Time Domain 21.</i>

TD32	<i>Time Domain</i> 32.
TW32	<i>Traveling Wave</i> 32.
TW87	<i>Traveling Wave</i> 87.
TPC	Transformador de potencial capacitivo.
UnB	Universidade de Brasília.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Desde a sua concepção, a energia elétrica tem viabilizado o desenvolvimento econômico e social em âmbito mundial, destacando-se como um dos recursos mais importantes para a sociedade moderna. No Brasil, o crescimento econômico industrial e o populacional potencializará o consumo de energia elétrica a uma taxa de 4,0% e 3,2% ao ano, respectivamente, até 2025 (EPE, 2016). Dessa forma, perante a expansão energética projetada, haverá uma maior exigência de confiabilidade, modernização e segurança sobre o Sistema Interligado Nacional (SIN).

O SIN consiste em uma rede elétrica formada por sistemas de geração, transmissão e distribuição interconectados de forma a melhorar os índices de qualidade e a confiabilidade de fornecimento de energia elétrica. Sabe-se que a maior parte do SIN é formada por linhas de transmissão (LTs), visto que a matriz energética no Brasil é predominantemente hidroelétrica e que as usinas de grande porte encontram-se situadas em áreas do país distantes entre si. Dessa forma, faz-se necessário o uso de LTs longas para interconexão das usinas geradoras com os centros de carga. No Brasil, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2014, o sistema de transmissão já possuía mais de 125.000 km de extensão (ONS, 2016), distância esta suficiente para dar mais de três voltas ao planeta Terra.

Em Sistemas de Energia Elétrica (SEE), entre 80% e 90% dos curtos-circuitos estão relacionados às LTs (TLEIS, 2008). De fato, quão mais extensas as LTs, maior a susceptibilidade à ocorrência de defeitos provocados por causas naturais, tais como: raios, chuvas e ventos fortes, bem como por outras causas de naturezas diversas, como: falhas humanas e de equipamentos, atos de vandalismo, etc. Portanto, é notável a importância de sistemas de proteção de LTs confiáveis que sejam capazes de garantir a segurança das instalações elétricas e dos usuários, bem como de promover desligamentos seletivos, evitando blecautes de grandes proporções.

Com objetivo de reduzir danos aos equipamentos do SIN, à vida humana e prejuízos econômicos à sociedade, os procedimentos de rede do ONS impõem que o tempo máximo de eliminação do defeito, incluindo o tempo de abertura dos disjuntores dos terminais da LT protegida, não ultrapasse 100 ms para sistemas cujos níveis de tensão nominais são iguais ou superiores a 345 kV e 150 ms nos sistemas com tensão nominal inferior a 345 kV (ONS, 2011b). Somado à referida exigência, impõe-se ainda que os relés de proteção devem atuar de maneira correta em 95% do total de solicitações de atuação (ONS, 2011a). Assim, em decorrência das exigências supracitadas e também com o objetivo de aumentar as margens de estabilidade dos SEEs, a busca por sistemas de proteção cada vez mais rápidos tem sido intensificada ao longo dos últimos anos, motivando em âmbito mundial diversas pesquisas correlatas ao tema.

Em 1976, comprovou-se que uma redução de um ciclo na duração de faltas em uma LT da *Bonneville Power Administration* poderia possibilitar uma transferência adicional de potência da ordem de 250 MW, ou seja, 15 MW/ms (EASTVEDT, 1976). Porém, assumindo uma falta com uma dada severidade, sabe-se que quão maior for a potência elétrica transferida no sistema com defeito, maior será a variação da velocidade das máquinas elétricas de geração, o que resulta em uma menor margem de estabilidade da rede elétrica (GLOVER *et al.*, 2011). Assim, entende-se que o uso de funções de proteção rápidas reduzem o tempo de aceleração das máquinas, aumentando conseqüentemente as margens de estabilidade das redes elétricas. Além disso, existindo a certeza de atuações rápidas, confiáveis e seguras, pode-se ainda vislumbrar um aumento da potência transferida em LTs, sem a necessidade da implementação de novos sistemas de transmissão (SCHWEITZER *et al.*, 2014; ANDERSON, 1999).

Os sistemas de proteção tradicionais são baseados normalmente na estimação de fasores fundamentais dos sinais de tensão e corrente do sistema elétrico de potência. Esses sistemas de proteção, embora seguros e largamente utilizados, possuem um atraso intrínseco a depender do tamanho da janela de dados utilizada no processo de estimação fasorial. Neste contexto, sabe-se que o processo de janelamento de dados consiste basicamente na delimitação de um conjunto de amostras consecutivas de um dado sinal cujo fasor será estimado. Assim, durante um curto-circuito, existe uma fase de transição dos fasores durante a passagem da janela de dados do período de pré-falta para o período de falta. Como resultado, medições corretas dos fasores fundamentais estimados só são obtidas após o período de transição da janela de dados,

ou seja, quando a janela contiver apenas amostras do período de falta. Deve-se ressaltar que algumas funções de proteção são habilitadas para atuar até mesmo durante período de transição das janelas de dados. Entretanto, sabendo-se que as funções de proteção são projetadas para atuar com base em medições fasoriais no regime permanente de falta, diz-se normalmente que o processo de estimação fasorial resulta em atrasos no tempo de atuação das proteções tradicionais da ordem do tamanho das janelas de dados empregadas, as quais variam tipicamente de meio a um ciclo e meio da componente fundamental (SCHWEITZER; HOU, 1993).

Assim sendo, tem-se como alternativa para a aceleração das atuações das proteções o uso de funções aplicadas no domínio do tempo, as quais não requerem o processo de estimação fasorial. Baseando-se nesta constatação e tomando vantagem dos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, no que diz respeito aos relés microprocessados, tonou-se factível e possível o desenvolvimento de relés numéricos modernos com o objetivo de reduzir os atrasos nos tempos de detecção de faltas, a exemplo do dispositivo recentemente lançado no mercado, o SEL-T400L (SCHWEITZER *et al.*, 2015). As funções deste dispositivo de proteção utilizam dos princípios de ondas viajantes e de grandezas incrementais para o desenvolvimento de elementos de proteção de distância, direcionais de potência e diferenciais, cujo objetivo é proteger os sistemas de transmissão de energia elétrica. Assim, tratando-se de uma tecnologia ainda pouco empregada no setor elétrico, são necessários estudos para fins de melhor entendimento das potencialidades e limitações das referidas funções.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é apresentar o princípio de funcionamento e conceitos relacionados à implementação numérica das funções de proteção no domínio do tempo disponíveis no relé SEL-T400L, a saber: TD32 e TW32, elementos direcionais de potência baseados em grandezas incrementais e ondas viajantes, respectivamente; TD21, elemento de distância baseado em grandezas incrementais; e TW87, elemento diferencial baseado em ondas viajantes. Por fim, tem-se ainda como objetivo avaliar a operação dessas funções sob diferentes cenários típicos de falta e de operação dos SEEs. Como objetivos específicos, citam-se ainda:

- Fazer uma revisão bibliográfica que contemple algoritmos de proteção aplicados no domí-

nio do tempo reportados na literatura;

- Fundamentar os algoritmos de proteção disponíveis no relé SEL-T400L;
- Estudar os métodos de parametrização divulgados para ajuste das funções avaliadas;
- Executar simulações no *Alternative Transient Program* (ATP) com o objetivo de avaliar a atuação das proteções analisadas.

Em relação à divulgação dos resultados obtidos na presente linha de pesquisa, enumeram-se as seguintes publicações:

1. RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V.; LEITE Jr., E. Influência da Componente CC de Decaimento Exponencial sobre o Desempenho de Elementos Direcionais Aplicados no Domínio do Tempo. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2016)*, Natal-RN, 2016.
2. LOPES, F. V.; LEITE Jr., E.; RIBEIRO, J. P. G. Avaliação de Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2016)*, Natal-RN, 2016.
3. LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; RIBEIRO, J. P. G.; BAINY, R. G. Avaliação da Influência dos TPCs sobre o Desempenho de Funções de Proteção Baseadas no Domínio do Tempo. *XIII Seminário Técnico de Proteção e Controle (XIII STPC)*, Brasília-DF, 2016.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre funções de proteção no domínio do tempo;
- Capítulo 3: Fundamentação teórica das funções de proteção disponíveis no SEL-T400L;
- Capítulo 4: Princípio de operação e implementação das funções de proteção avaliadas;
- Capítulo 5: Procedimento para ajuste das funções de proteção avaliadas;
- Capítulo 6: Apresentação de resultados obtidos de testes realizados considerando diferentes cenários de falta;
- Capítulo 7: Conclusões acerca dos resultados obtidos e propostas de trabalhos futuros com o intuito de dar continuidade ao estudo realizado.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, com o objetivo de facilitar o entendimento das funções de proteção que serão apresentadas no decorrer deste trabalho, apresenta-se uma revisão bibliográfica do estado da arte no que diz respeito às funções de proteção aplicadas no domínio do tempo. A apresentação dos trabalhos segue uma sequência histórica cujo objetivo é destacar a evolução ao longo dos anos dos algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo.

Os primeiros trabalhos das funções de proteção baseadas na análise de sinais elétricos no domínio do tempo surgiram no final da década de 70 e no início da década seguinte (DOMMEL; MICHELS, 1978; TAKAGI *et al.*, 1977; CHAMIA; LIBERMAN, 1978; TAKAGI *et al.*, 1979; JOHNS, 1980; VITINS, 1981). Nestes trabalhos, evidencia-se a possibilidade de processar informações contidas em transitórios induzidos por distúrbios em sistemas de transmissão, com o objetivo de tornar os dispositivos de proteção mais rápidos.

Visando melhorar as margens de estabilidade de uma LT da *Bonneville Power Administration* (BPA) e, conseqüentemente, viabilizar o aumento a potência transferida ao longo da mesma de forma segura, Chamia & Liberman (1978) desenvolveram um dos primeiros dispositivos de proteção baseados na teoria de grandezas incrementais. Tratava-se de um relé dotado de uma função direcional de potência que utiliza da diferença de polaridade entre tensões e correntes incrementais para determinar a origem dos transitórios induzidos pelo defeito, ou seja, se eram provenientes de distúrbios diretos ou reversos em relação ao dispositivo de proteção. Devido às limitações tecnológicas da época, o processamento de sinais empregado no dispositivo promovia limitações ao tempo de atuação do algoritmo, resultando em atuações da ordem de meio ciclo da componente fundamental. Somado a este fator, distorções nos sinais de tensão medidos decorrentes da resposta transitória de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) prejudicavam a identificação da direção do defeito, tornando a função dependente de TPCs de alta confiabilidade.

Dando sequência ao desenvolvimento de algoritmos de proteção que utilizam da teoria das grandezas incrementais, Vitins (1981) apresentou um esquema direcional de potência que identifica a direcionalidade da falta a partir das trajetórias elípticas descritas em um plano formado a partir das grandezas incrementais de corrente e tensão do sistema. Vitins (1981) destaca a necessidade de regiões de restrição neste plano para que o elemento direcional promova detecções seguras. Além disso, mostra também que a componente CC de decaimento exponencial presente principalmente nos sinais de corrente influencia as trajetórias neste plano, retardando o tempo de atuação da proteção.

O trabalho de Engler *et al.* (1985) propõe melhorias no elemento direcional apresentado por Vitins (1981). Utilizando-se de um plano formado pelas tensões incremental e réplica incremental, promoveu-se um estreitamento das trajetórias descritas pelo elemento direcional de potência, o que facilitou a identificação da direção do defeito. Engler *et al.* (1985) ainda propõem o uso de um torque integrado de tal forma que a variável resultante se mantenha em duas regiões específicas do plano de operação da proteção, uma para faltas internas e outra para faltas externas à LT. Dessa forma, ao invés de observar a trajetória ao longo do plano das tensões incrementais, compara-se o torque integrado com um dado limiar para identificar a direção de falta.

Dando início ao desenvolvimento das funções de proteção baseadas na teoria das ondas viajantes, Dommel & Michels (1978) propõem o uso de um discriminante, também conhecido como fator D, obtido a partir das ondas viajantes de tensão e corrente incidentes em cada um dos terminais da linha para produzir um elemento direcional de potência. Destaca-se, neste trabalho, que este discriminante é elevado para faltas internas e próximo de zero para faltas externas à linha. A partir da comunicação entre os relés nos terminais da LT, verificam-se os valores do fator D em ambos os terminais, de forma que, sendo esses valores elevados, a bobina do disjuntor da LT é energizada. Por fim, uma vez que utiliza ondas viajantes de tensão, pode-se dizer que o algoritmo de Dommel & Michels (1978) requer alta confiabilidade das medições dos sinais de tensão e corrente para garantir atuações seguras.

O trabalho de Johns (1980) também apresenta elementos direcionais que utilizam da teoria de ondas viajantes para prover atuações mais rápidas que os algoritmos de proteção tradicionais. Este trabalho introduz o princípio de separação das ondas viajantes em ondas incidentes e

refletidas para tomar decisões de operação. A sequência em que as ondas incidentes e refletidas superam um limiar pré-determinado indica a direção da falta. Este princípio de operação tem como limitação o uso das ondas refletidas principalmente quando aplicada em sistemas com múltiplas linhas, nos quais verifica-se elevada quantidade de ondas refletidas nos terminais do sistema a depender da local da falta.

Funções de proteção diferencial baseadas na teoria de ondas viajantes foram apresentadas nos trabalhos de Takagi *et al.* (1977), Takagi *et al.* (1979). Estas funções utilizam as equações de Bergeron para obter sinais diferenciais para cada terminal da LT, a partir dos quais é definida a operação da proteção. Valores elevados dos sinais diferenciais indicam a presença de faltas na linha e aqueles próximos de zero indicam a ausência de falta ou a presença de falta externa ao sistema de transmissão monitorado. As proteções diferenciais reportadas em Takagi *et al.* (1977) e Takagi *et al.* (1979) são baseadas na análise das ondas viajantes de tensão e corrente incidentes, requerem canais de comunicação de alta capacidade e preciso alinhamento entre os sinais de tensão e corrente nos terminais local e remoto da LT monitorada. Ainda, por usar das OV's de tensão, as funções também requerem medições confiáveis dos transitórios de tensão para promoverem atuações seguras, o que pode ser comprometido pelas distorções no sinais provenientes da resposta transitória dos TPCs.

Por fim, ainda na década de 80, Crossley & McLaren (1983) propõem uma função de proteção de distância fundamentada na teoria das ondas viajantes. A proteção utiliza dados de apenas um terminal e, portanto, não requer o uso de canais de comunicação. Basicamente, utilizando-se da diferença de tempo entre a primeira onda incidente e a primeira onda refletida do ponto de defeito, estima-se a localização do defeito. Assim, comparando a distância estimada com o tamanho da zona protegida, os conceitos tradicionais da proteção de distância são aplicados. Percebe-se que a função proposta por Crossley & McLaren (1983) apresenta limitações quando aplicada a sistemas com LTs adjacentes, cujo comprimento é menor do que a distância até o local do defeito na linha monitorada. De fato, ondas refletidas em terminais adjacentes podem ser confundidas com ondas refletidas no ponto de falta, fazendo-se necessário o uso de algoritmos para distinção entre essas frentes de onda.

A década de 80 é reconhecidamente uma das épocas de maior produção de trabalhos na área das funções de proteção no domínio do tempo. Após este período, embora muito tenha sido

realizado no âmbito da localização de faltas, somente por volta dos anos 2000 é que ressurgiram linhas de pesquisa focadas em algoritmos de proteção rápidos, com o renascimento de funções como a de comparação de fases, dessa vez sendo aplicada no domínio do tempo (KASZTENNY *et al.*, 2006). Esta função se baseia na análise dos sinais modulados de corrente para identificar faltas internas ou externas à LT monitorada. Trata-se de um algoritmo bastante simples, praticamente sem necessidade de ajustes. Por utilizar a modulação de sinais, a largura de banda do canal de comunicação entre os relés dos terminais local e remoto é baixa, o que torna o esquema simples e fácil de aplicar. Essas funções tem as versões de meio ciclo e de ciclo completo, as quais consistem em algoritmos que realizam a comparação de fases considerando apenas os semi-ciclos positivos e os semi-ciclos positivos e negativos, respectivamente. Neste contexto, sabe-se que os ângulos de incidência de falta podem afetar ambas as versões, em decorrência do surgimento de componentes CC de decaimento exponencial, retardando o tempo de atuação da proteção. Cabe ressaltar que a comparação de fases tradicional no domínio do tempo é capaz de operar em tempos da ordem um quarto de ciclo (KASZTENNY *et al.*, 2006), tempo este menor do que os algoritmos tradicionais baseados em fasores, porém maior do que os algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes.

O trabalho apresentado por Finney *et al.* (2010) propõe o uso da transformada de Clarke em conjunto com um filtro para compensação da resposta em frequência dos TPCs para prover tempos de atuações mais rápidos do que as funções de distância tradicionais. Como resultado, são obtidos tempos de atuação da proteção entre um quarto e meio ciclo da componente fundamental. Ainda, a compensação da resposta do TPC utilizada neste algoritmo apresenta limitações, uma vez que utiliza-se de um modelo genérico de TPC para compensar a resposta de qualquer TPC que possa vir a ser aplicado ao dispositivo de proteção.

Recentemente, Schweitzer *et al.* (2014) apresentaram em seu trabalho funções de proteção aplicadas no domínio do tempo e que se baseiam na teoria das grandezas incrementais e na teoria das ondas viajantes para promover atuações rápidas, em tempos menores ou iguais a um quarto de ciclo da componente fundamental, a depender da função de proteção empregada. Dentre as funções de proteção apresentadas, destacam-se quatro: duas funções direcionais de potência baseadas em grandezas incrementais e nas ondas viajantes, TD32 e TW32, respectivamente; uma função de distância baseada na teoria das grandezas incrementais, TD21; e, por fim, uma

função diferencial de LTs baseada na teoria das ondas viajantes, TW87. Embora utilize ondas viajantes de tensão e corrente incidentes para identificar a direção da falta, a TW32 requer confiabilidade somente da informação de polaridade da primeira onda tensão incidente para garantir *trips* rápidos e seguros. A TW87 utiliza somente das ondas viajantes de corrente incidentes para implementar o seu esquema diferencial. As funções baseadas em grandezas incrementais utilizam da corrente réplica incremental para reduzir os efeitos da componente CC de decaimento exponencial na resposta da proteção. Ainda, utilizando de limiares adaptativos, a TD32 identifica rapidamente a direcionalidade do curto-circuito. Por fim, a TD21 utiliza do perfil de tensão de curto-circuito ao longo da linha, para implementar um princípio de operação simples em um esquema de transferência direta de *trip*.

Schweitzer *et al.* (2015) apresentaram o primeiro dispositivo de proteção do mercado mundial a integrar, em um mesmo relé microprocessado, funções de proteção aplicadas unicamente no domínio do tempo, fundamentando-se nas teorias das ondas viajantes e das grandezas incrementais. Esse relé, chamado de SEL-T400L, tem fabricação sob domínio da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL, 2016) e possui as funções TW32, TD32, TD21 e TW87, as quais interagem entre si para prover atuações seguras, viabilizando *trips* rápidos quando houver certeza da ocorrência de curtos-circuitos na LT monitorada e bloqueadas quando da incerteza da natureza do distúrbio. Por isso, o fabricante do SEL-T400L sugere o uso de relés parceiros tradicionais, conferindo confiabilidade ao esquema de proteção em situações nas quais o distúrbio é menos adverso, para os quais as proteções baseadas na teoria das ondas viajantes e em elementos incrementais podem não atuar (SEL, 2016). Ainda, Schweitzer *et al.* (2015) apresentam uma análise comparativa do desempenho destas funções com as funções de proteção tradicionais, mostrando-se que as proteções no domínio do tempo podem atuar mais rapidamente, mantendo-se a mesma segurança das funções tradicionais.

Caracterizadas como novidade no estado da arte, Kasztenny *et al.* (2016) apresentaram um procedimento de ajustes das funções de proteção dispostas no T400L com o intuito de auxiliar os engenheiros eletricitas da área de proteção quanto a aplicação em campo deste dispositivo. Neste trabalho, embora os cálculos da maioria dos ajustes sejam descritos, alguns outros são mantidos em sigilo de fábrica, o que torna mais complicada a reprodução das funções do T400L.

Diante do exposto nesta revisão bibliográfica, percebe-se que, embora antigo, o uso de fun-

ções de proteção de LTs no domínio do tempo se tornou realidade em anos recentes. Neste contexto, pode-se dizer que o relé SEL-T400L é pioneiro em vários aspectos e, portanto, inovador. Assim, uma vez que as funções disponíveis no referido dispositivo não são utilizadas ainda em larga escala, faz-se necessária a realização de estudos que colaborem para um melhor entendimento das funções do T400L, bem como de seu desempenho e peculiaridades em seus ajustes. Com isso, espera-se facilitar a compreensão dessa nova tecnologia, a qual vem ganhando ano após ano espaço no setor elétrico.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais que embasam os algoritmos de proteção disponíveis do relé SEL-T400L. O entendimento desta fundamentação teórica facilitará a compreensão das funções de proteção que serão analisadas nos capítulos subsequentes.

3.1 FALTAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Durante a operação normal dos SEEs, os parâmetros das LTs são bem definidos e praticamente constantes, apresentando apenas pequenas variações decorrentes de fatores relacionados principalmente às condições climáticas e vegetação da região onde a linha se encontra instalada. Portanto, quaisquer ocorrências que provoquem modificações relevantes de tais parâmetros resultam em transitórios no SEE, cuja amplitude depende das características de operação e de aterramento da rede elétrica em questão (ZANETTA Jr., 2003; LOPES, 2014b).

Dentre os possíveis distúrbios que podem ocorrer em um SEE, as faltas são normalmente classificadas como um dos tipos mais preocupantes, visto que ocasionam desligamentos não-programados dos sistemas, podendo submeter a rede elétrica a condições operacionais de grande estresse. De fato, a ocorrência de faltas em LTs resulta em mudanças operacionais repentinas na operação dos SEEs, fazendo as amplitudes e ângulos fase das correntes e tensões estabilizarem em condições diferentes das nominais, as quais, a depender das características da falta, podem atingir valores perigosos para os SEEs, fato este que justifica o uso de esquemas de proteção (ANDERSON, 1999).

Durante a passagem do regime permanente da operação normal do sistema até o regime permanente de falta, verifica-se um período de transição durante o qual são observados transitórios de falta. Neste contexto, sabe-se que esses transitórios eletromagnéticos contêm informações

relacionadas à origem do distúrbio e à topologia do sistema elétrico (GREENWOOD, 1991), de modo que, de sua análise, podem ser estimadas informações do distúrbio, a exemplo da duração do distúrbio, local do defeito, direcionalidade da falta, tipo e resistência da falta, entre outras (FAYBISOVICH *et al.*, 2010; SAHA *et al.*, 2010). Dessa forma, usando as técnicas apropriadas, é possível extrair informações relevantes do defeito, mesmo que durante o período transitório da falta, o qual é reconhecidamente curto. É com base nessa possibilidade que boa parte dos algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo são desenvolvidos.

Sendo o relé SEL-T400L o objeto de estudo do presente trabalho, torna-se importante o entendimento dos conceitos fundamentais que embasam as suas funções de proteção. Neste contexto, pode-se afirmar que as funções de proteções do relé SEL-T400L se baseiam predominantemente em dois conceitos principais, a saber: 1) Princípio da Superposição; e 2) Teoria das Ondas Viajantes; cujos fundamentos são abordados a seguir.

3.2 O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO E AS GRANDEZAS INCREMENTAIS

O princípio da superposição estabelece que em qualquer rede elétrica linear que contenha múltiplas fontes independentes, a corrente ou tensão em qualquer ponto da rede pode ser calculada como a soma algébrica das contribuições individuais de cada fonte atuando isoladamente (IRWIN; NELMS, 2015). Assim, um sistema elétrico sob falta pode ser modelado a partir da contribuição de duas redes elétricas em separado: um circuito de pré-falta, representando as correntes e tensões de carga durante a operação normal do sistema; e um circuito puro de falta, representando as variações nos sinais de tensão e corrente geradas unicamente pelo defeito. Dessa forma, as tensões e correntes em qualquer ponto da rede sob falta é determinado pelo somatório das componentes de pré-falta e de falta, conforme apresentado na Figura 3.1 para um curto-circuito franco.

Cabe ressaltar que, antes da incidência do curto-circuito, o circuito puro de falta não existe, de forma que suas grandezas elétricas são idealmente nulas. Porém, no momento de ocorrência do distúrbio, o circuito puro de falta é energizado e um período transitório perdura até que seja alcançado o regime permanente de curto-circuito. Na Figura 3.1, considerando uma falta franca, a variação da tensão no ponto de falta é representada por uma fonte de tensão de

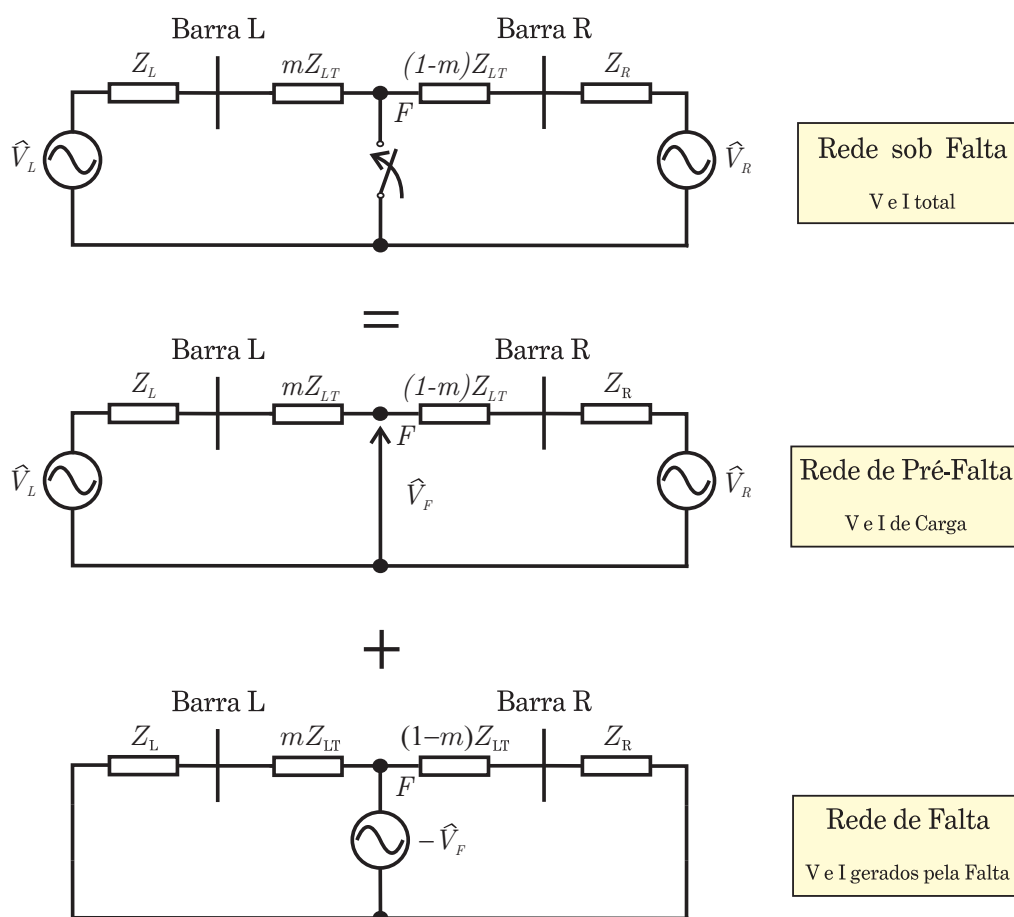


Figura 3.1. Aplicação do princípio da superposição para análise de curto-circuito.

mesma magnitude e em oposição de fase à tensão V_F verificada no ponto de defeito no circuito de pré-falta no instante de tempo imediatamente anterior à incidência do curto-circuito. Obviamente, sendo o curto-circuito estabelecido por meio de uma resistência, a tensão no ponto de falta não seria nula e, portanto, a fonte no circuito puro de falta teria valor correspondente apenas ao afundamento de tensão verificado. Ainda em relação à Figura 3.1, nota-se que, independentemente da condição de falta considerada, a aplicação do curto-circuito corresponde ao fechamento da chave localizada no ponto F em um instante igual ao momento de energização da rede de falta (circuito puro de falta). Como resultado, as contribuições de corrente e tensão de carga e de curto-circuito podem ser avaliadas separadamente, facilitando o entendimento do distúrbio e a análise do defeito.

Baseando-se na análise dos sinais tomados do circuito puro de falta, Schweitzer *et al.* (2014) apresentam funções de proteção rápidas, que não requerem o processo de estimação fasorial. Para tanto, os sinais da rede sob falta (circuito real) são medidos a cada instante de processamento dos relés em conjunto com medições em instantes passados. Assim, ocorrendo uma falta

na rede elétrica, as medições atuais são tomadas como sendo do circuito com falta, enquanto que as medições atrasadas são tomadas como medições do circuito de pré-falta. Desse modo, subtraindo-se as medições atuais das medições atrasadas, são obtidas medições relacionadas ao circuito puro de falta, viabilizando a análise das variações impostas unicamente pelo distúrbio. Essas grandezas elétricas resultantes são tradicionalmente denominadas de grandezas incrementais, podendo ser calculadas da seguinte forma (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$\Delta s(t) = s(t) - s(t - p \cdot T) , \quad (3.1)$$

onde $\Delta s(t)$ é a grandeza incremental instantânea, s é o valor instantâneo medido do sinal avaliado (tensão ou corrente), T é o período fundamental da grandeza medida e p é um número arbitrário de ciclos que determina a duração da grandeza incremental obtida.

Na Figura 3.2, ilustra-se a grandeza incremental de corrente durante um curto-circuito, calculada considerando dois valores distintos de p . Do exposto, percebe-se que, idealmente, as grandezas incrementais contêm informações a respeito apenas dos transitórios da rede pura de falta. Entretanto, por consequência do seu equacionamento matemático, percebe-se também que as grandezas incrementais têm uma duração bem determinada dada por p , ou seja, após p ciclos do distúrbio, os sinais obtidos usando (3.1) já não são mais válidos, visto que todas as amostras utilizadas para sua obtenção se encontram no período de falta. Desse modo, perde-se a informação de regime permanente do sistema, tornando inviável o cálculo das grandezas incrementais. Por isso, elementos de proteção baseados em grandezas incrementais devem atuar enquanto esses elementos são válidos, de tal forma que, passando-se p ciclos do início do distúrbio, as funções baseadas em elementos incrementais devem ser bloqueadas (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

3.3 PARÂMETROS CONCENTRADOS *VERSUS* PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS

Situações nas quais os parâmetros dos SEEs variam subitamente resultam na indução de ondas eletromagnéticas de alta frequência que se propagam ao longo dos sistemas de transmissão. Essas ondas são popularmente por ondas viajantes (OVs) e contêm informações sobre os fenômenos transitórios que às originam, tais como curto-circuitos, procedimentos de chaveamento, descargas atmosféricas, entre outros (LOPES, 2014b).

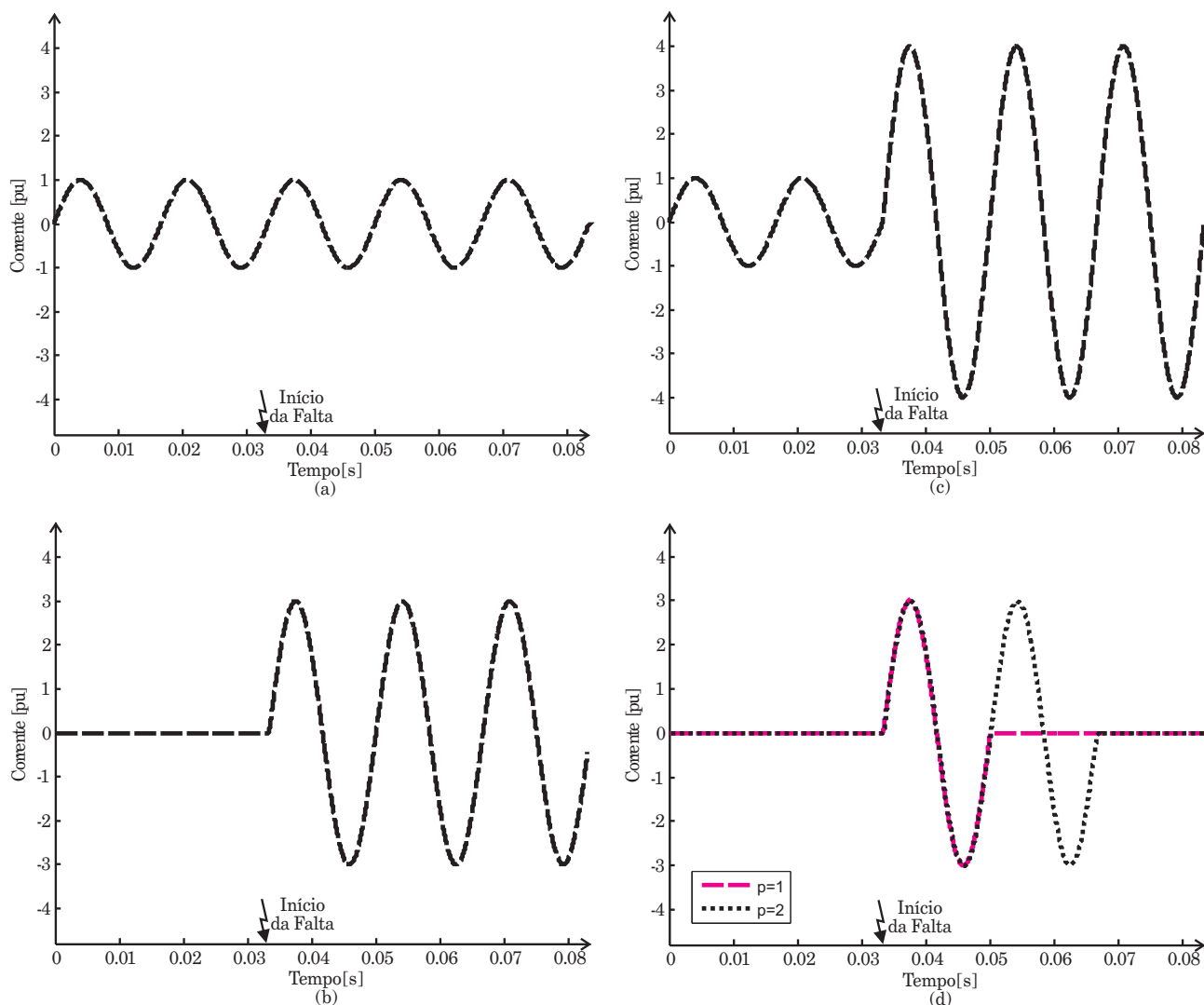


Figura 3.2. Sinais de corrente para um rede elétrica resistiva: (a) Corrente de carga; (b) Corrente de falta; (c) Corrente total; (d) Grandeza incremental de corrente para diferentes valores de p .

Embora analisar SEEs seja uma tarefa muitas vezes árdua, em regime permanente, essas análises são na grande maioria dos casos facilitadas pelo emprego de modelos a parâmetros concentrados. No SIN, por exemplo, sendo a frequência fundamental igual a 60 Hz, o comprimento de onda dos sinais elétricos é de aproximadamente 5000 km (LOPES *et al.*, 2016a), de tal modo que não existe perda relevante de precisão quando considerados modelos a parâmetros concentrados. De fato, como este elevado comprimento de onda ultrapassa as dimensões físicas da maioria dos componentes elétricos empregados nos SEEs, a representação do sistema em regime permanente a parâmetros concentrados se mostra suficientemente precisa (GLOVER *et al.*, 2011). No entanto, ao trabalhar com OV, altas frequências são avaliadas, de modo que as dimensões físicas das LTs e os comprimentos de onda dos sinais avaliados passam a ter mesma ordem de grandeza, requerendo a modelagem das LTs a parâmetros distribuídos.

Uma vez considerados os parâmetros distribuídos, os sinais de tensão e corrente passam a ser função do espaço e do tempo, dando a ideia de propagação ao longo das LTs com variações também temporais (GLOVER *et al.*, 2011). Assim, na ocorrência de curtos-circuitos em LTs, OVs de tensão e corrente são lançadas a partir do local do defeito, as quais se propagam na direção de ambos os terminais da LT com velocidades próximas à da luz (para LTs aéreas), conforme Figura 3.3. Mesmo com tal velocidade (considerada elevada), assumindo o uso de elevadas taxas de amostragem dos dispositivos registradores atuais, é possível verificar diferentes tempos de propagação das OVs, de forma que o início dos transitórios nos terminais da LT ocorre em instantes distintos (SLUIS, 2001), o que reforça a necessidade do uso de modelos a parâmetros distribuídos para representação das LTs durante estudos envolvendo fenômenos transitórios.

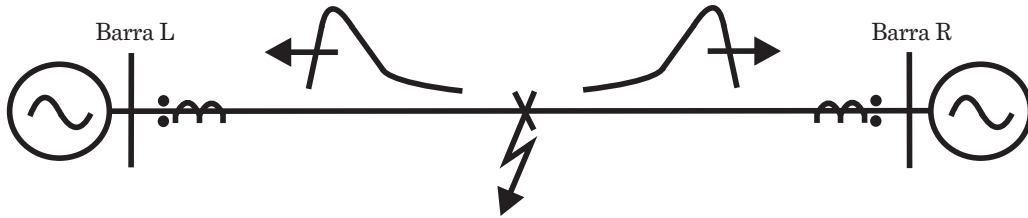


Figura 3.3. Propagação de ondas viajantes quando da ocorrência de uma falta (SCHWEITZER *et al.*, 2013).

3.3.1 Fenômeno de Propagação de OVs em Sistemas de Transmissão

O entendimento do fenômeno de propagação de OVs em sistema de transmissão passa também pela análise de sinais em uma LT quando considerado o modelo a parâmetros distribuídos. Para apresentar os fundamentos relacionados, considera-se um segmento de LT de comprimento Δx e o modelo completo de uma LT com parâmetros distribuídos R , L , G e C por unidade de comprimento são apresentados na Figura 3.4.

Aplicando as leis de Kirchhoff das correntes e das tensões no segmento de linha apresentado na Figura 3.4(a), obtêm-se:

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.2)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}. \quad (3.3)$$

Dividindo ambos os lados de (3.2) e (3.3) por Δx obtém-se a taxa de variação da tensão

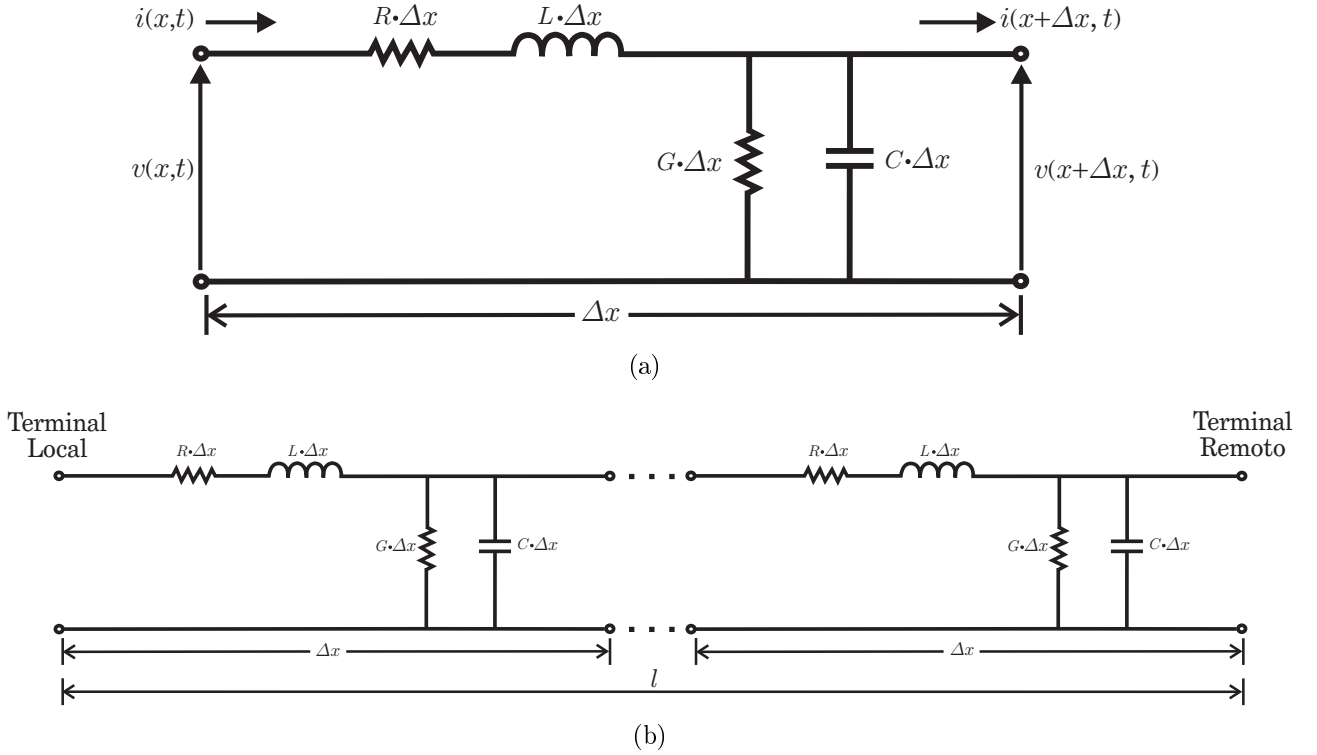


Figura 3.4. Modelo de LT a parâmetros distribuídos: (a) Segmento de comprimento Δx ; (b) Completo de uma linha de comprimento l .

e corrente com relação a Δx . Assim, tomando o comprimento do segmento de linha avaliado como infinitesimal ($\Delta x \rightarrow 0$), obtêm-se:

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -R \cdot i(x, t) - L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -G \cdot v(x, t) - C \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}. \quad (3.5)$$

Os sinais negativos em (3.4) e (3.5) indicam que a amplitude das ondas de tensão e corrente decresce quando estas se propagam ao longo do comprimento da LT (aumento de x) (SCHWEITZER *et al.*, 2013). Ao aplicar a transformada de Laplace em (3.4) e (3.5), torna-se possível transformar as equações no domínio do tempo para o domínio da frequência, resultando em (SCHWEITZER *et al.*, 2013):

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -(R + s \cdot L) \cdot I(x, s), \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -(G + s \cdot C) \cdot V(x, s), \quad (3.7)$$

onde $V(x, s)$ e $I(x, s)$ são as transformadas de Laplace de $v(x, t)$ e $i(x, t)$, respectivamente, considerando-se as condições iniciais nulas.

Denominando $Z = R + s \cdot L$ e $Y = G + s \cdot C$, (3.6) e (3.7) são reduzidas a:

$$\frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -Z \cdot I(x, s) , \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -Y \cdot V(x, s) . \quad (3.9)$$

Derivando (3.8) e (3.9) com relação a x pode se obter:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{I(x, s)}{\partial x} , \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{V(x, s)}{\partial x} . \quad (3.11)$$

Portanto, substituindo (3.8) e (3.9) em (3.10) e (3.11), obtêm-se as equações diferenciais que descrevem matematicamente as OV's de corrente e tensão que se propagam nas LTs:

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = Z \cdot Y \cdot V(x, s) , \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = Y \cdot Z \cdot I(x, s) . \quad (3.13)$$

A constante de propagação da onda γ , pode ser definida de acordo com

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \alpha + j \cdot \beta . \quad (3.14)$$

Assim, substituindo γ nas equações diferenciais (3.12) e (3.13), obtêm-se (SCHWEITZER *et al.*, 2013):

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot V(x, s) = 0 , \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot I(x, s) = 0 , \quad (3.16)$$

onde a parte real α e a parte imaginária β da constante de propagação γ representam as constantes de atenuação e de fase da OV, respectivamente.

Dessa forma, as soluções gerais de (3.15) e (3.16), apresentadas em (3.17) e (3.18), definem qualquer OV de tensão ou corrente que se propaga em LTs, independente das condições de contorno no momento em que essas ondas são lançadas pelo distúrbio:

$$V(x, s) = V_i(s) \cdot e^{-\gamma x} + V_r(s) \cdot e^{+\gamma x} , \quad (3.17)$$

$$I(x, s) = I_i(s) \cdot e^{-\gamma x} + I_r(s) \cdot e^{+\gamma x} . \quad (3.18)$$

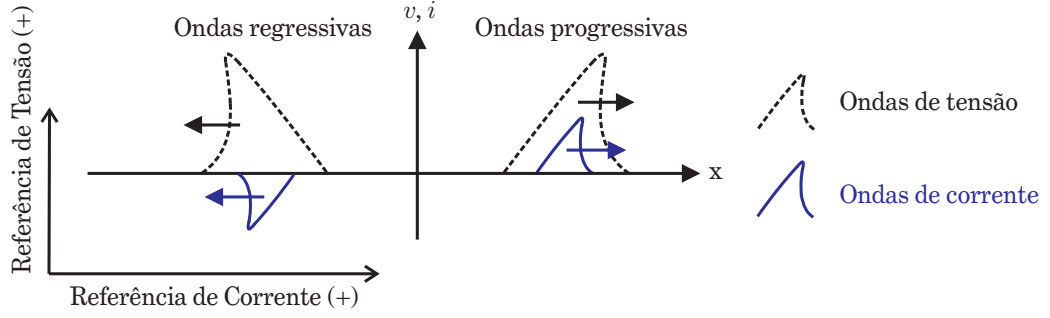


Figura 3.5. Ondas progressivas e regressivas (LOPES, 2014b).

A partir de (3.17) e (3.18), conclui-se que as ondas eletromagnéticas de tensão e corrente são formadas pela superposição de componentes que se propagam em sentidos opostos: as ondas progressivas ($V_i(s) \cdot e^{-\gamma x}$ e $I_i(s) \cdot e^{-\gamma x}$) e ondas as regressivas ($V_r(s) \cdot e^{+\gamma x}$ e $I_r(s) \cdot e^{+\gamma x}$), conforme apresentado na Figura 3.5.

Substituindo (3.17) e (3.18) em (3.8) e (3.9), obtêm-se:

$$\gamma \cdot (-V_i(s) \cdot e^{-\gamma x} + V_r(s) \cdot e^{+\gamma x}) = -Z \cdot (I_i(s) \cdot e^{-\gamma x} + I_r(s) \cdot e^{+\gamma x}), \quad (3.19)$$

$$\gamma \cdot (-I_i(s) \cdot e^{-\gamma x} + I_r(s) \cdot e^{+\gamma x}) = -Y \cdot (V_i(s) \cdot e^{-\gamma x} + V_r(s) \cdot e^{+\gamma x}). \quad (3.20)$$

Por fim, igualando os coeficientes de $e^{-\gamma x}$ e de $e^{+\gamma x}$ em ambos os lados de (3.19) e (3.20), obtêm-se:

$$Z_c = \frac{V_i(s)}{I_i(s)} = -\frac{V_r(s)}{I_r(s)} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}. \quad (3.21)$$

Avaliando a razão entre as componentes incidentes e refletidas das OV's de tensão e corrente para qualquer ponto ao longo da LT, de acordo com (3.19)-(3.21), percebe-se que a mesma é mantida constante e depende exclusivamente dos parâmetros da LT. A razão Z_c é denominada impedância característica da LT.

Diante do exposto, conclui-se a solução geral para a onda eletromagnética de corrente pode ser reescrita da seguinte forma:

$$I(x, s) = \frac{1}{Z_c} \cdot (V_i(s) \cdot e^{-\gamma x} - V_r(s) \cdot e^{+\gamma x}). \quad (3.22)$$

Cabe ressaltar que, ao considerar a análise de sinais de alta frequência, como no caso do estudo de OV's, nota-se que as parcelas imaginárias de Z e Y em (3.21) são muito maiores que as parcelas reais relacionadas às perdas na LT. Assim, assumindo que o estudo de OV's estará normalmente relacionado à análise de componentes de alta frequência, pode-se desprezar as

perdas na LT, resultando em uma impedância dada por $Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}$, a qual é denominada impedância de surto. Tradicionalmente, em procedimentos de cálculo de OV's em sistemas de transmissão, é esta impedância Z_s que é considerada.

3.3.2 Reflexão e Refração de OV's em Descontinuidades

Na seção anterior, foram apresentados conceitos importantes relacionados à propagação de OV's em LTs. Entretanto, para saber a amplitude das OV's medidas nos terminais das linhas monitoradas, é necessário aplicar conceitos relacionados aos coeficientes de reflexão e refração em pontos de descontinuidade do sistema em questão, a exemplo dos terminais nos quais são tomadas as medições de OV's de tensão e corrente.

No momento em que as ondas eletromagnéticas induzidas pela falta incidem em descontinuidades presentes entre sistemas adjacentes de impedâncias características diferentes ou dentro de um mesmo sistema quando da variação da impedância característica (como nos pontos de curto-circuito), as OV's se dividem em duas componentes: uma parcela refletida e outra refratada (também denominada de OV transmitida).

Na Figura 3.6, é apresentado o diagrama de reflexões das OV's (também conhecido como diagrama de Lattice (BEWLEY, 1931)) para uma falta ocorrida no ponto F de uma LT de comprimento l , a qual é circundada por sistemas adjacentes idênticos (representados pelos equivalentes de Thévenin nos terminais da LT), e distante de d quilômetros da Barra 1. Proposto por Bewley (1931) para análise de OV's em SEEs, este diagrama é uma forma simplificada de representar as reflexões das ondas eletromagnéticas para um determinado transitório. O eixo vertical do referido diagrama representa o tempo. Assim, no eixo vertical da presente figura, encontram-se representados os instantes de chegada das OV's incidentes (t_{11} e t_{21}), refletida (t_{12}) e refratadas (t_{11r} e t_{21r}). Por outro lado, o eixo horizontal representa o espaço, viabilizando o entendimento da propagação das OV's ao longo dos parâmetros distribuídos da LT. Para simplificar o entendimento do diagrama de Lattice neste trabalho, considerou-se uma mesma velocidade de propagação v_p das OV's, a qual é representada pela inclinação das retas nos diagramas de Lattice apresentados (LOPES, 2014b).

Considerando ainda o sistema ilustrado na Figura 3.6, no instante de incidência das OV's

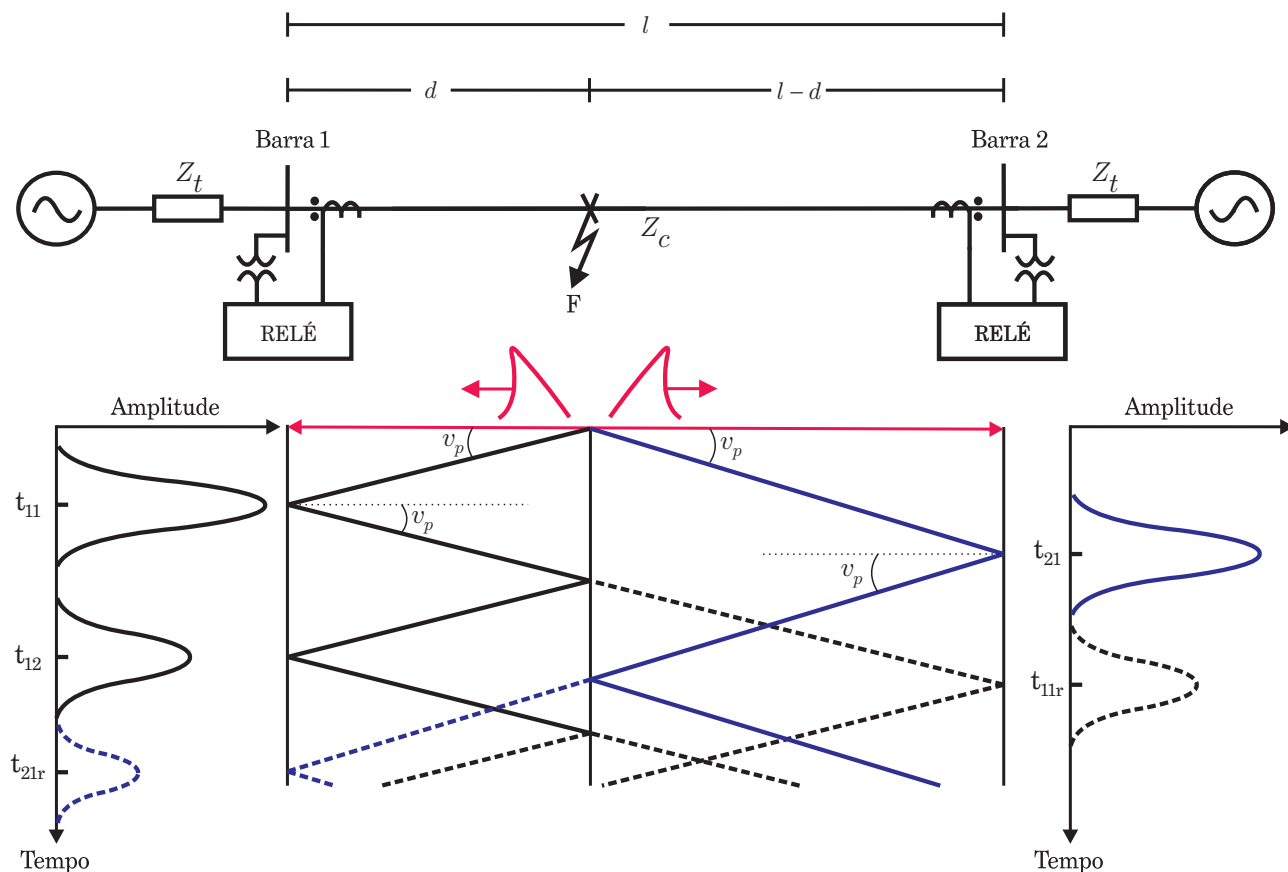


Figura 3.6. OV's incidentes, refletidas e refratadas para uma falta em uma LT (LOPES, 2014b).

nos terminais monitorados, as seguintes relações são verificadas (ZANETTA Jr., 2003):

$$V_i + V_r = V_m, \quad (3.23)$$

$$I_i + I_r = I_m, \quad (3.24)$$

em que V_i , I_i , V_r , I_r , V_m e I_m representam as OV's de tensão e corrente incidentes, refletidas e medidas, respectivamente.

Do exposto, nota-se então que os dispositivos de proteção localizados nos terminais da LT medem a soma da OV's incidentes e refletidas, e não apenas a onda incidente. Assim, visto que a razão entre as tensões e correntes incidentes e refletidas em qualquer ponto da LT é mantida constante (de acordo com (3.21)), é possível obter relações matemáticas que descrevem os coeficientes de reflexão e refração nas terminações.

Sabendo que em um dado terminal com terminação Z_t é medida uma OV de corrente que vem de uma LT com impedância característica Z_c , existirá uma OV de tensão medida que será proporcional ao produto da OV de corrente medida pela impedância terminal Z_t . Desse modo,

considerando as relações matemáticas já apresentadas, torna-se possível obter uma relação entre as OV's incidentes e refletidas:

$$V_r = \frac{Z_t - Z_c}{Z_t + Z_c} \cdot V_i = \Gamma_{(V)r} \cdot V_i, \quad (3.25)$$

em que $\Gamma_{(V)r}$ é denominado coeficiente de reflexão da onda de tensão e definido por:

$$\Gamma_{(V)r} = \frac{Z_t - Z_c}{Z_t + Z_c}. \quad (3.26)$$

A partir de (3.23) e de (3.25), obtém-se o coeficiente de refração ($\Gamma_{(V)t}$) da OV de tensão:

$$V_t = (1 + \Gamma_{(V)r}) \cdot V_i = \Gamma_{(V)t} \cdot V_i, \quad (3.27)$$

$$\Gamma_{(V)t} = \frac{2 \cdot Z_t}{Z_t + Z_c}. \quad (3.28)$$

Os coeficientes de reflexão $\Gamma_{(I)r}$ e refração $\Gamma_{(I)t}$ das OV's de corrente podem ser obtidos de forma análoga. Utilizando-se de (3.25), é possível mostrar que:

$$I_r = -\frac{\Gamma_{(V)r} \cdot V_i}{Z_c}, \quad (3.29)$$

e de (3.21) que:

$$I_r = -\Gamma_{(V)r} \cdot I_i = \Gamma_{(I)r} \cdot I_i. \quad (3.30)$$

Dessa forma, o coeficiente de reflexão das OV's de corrente é dado por:

$$\Gamma_{(I)r} = -\Gamma_{(V)r} = \frac{Z_c - Z_t}{Z_c + Z_t}. \quad (3.31)$$

Já a componente refratada é obtida da seguinte forma:

$$I_t = (1 + \Gamma_{(I)r}) \cdot I_i = \Gamma_{(I)t} \cdot I_i. \quad (3.32)$$

Assim sendo, temos o coeficiente de refração da onda de corrente:

$$\Gamma_{(I)t} = 1 - \Gamma_{(V)r} = \frac{2 \cdot Z_c}{Z_c + Z_t}. \quad (3.33)$$

Com base no conhecimento dos coeficientes de reflexão e refração obtidos, será possível entender melhor o comportamento das OV's induzidas em casos de curtos-circuitos. Além disso, esses conceitos serão importantes para o entendimento de alguns procedimentos de ajuste das funções do SEL-T400L baseadas na teoria das OV's, conforme será apresentado em capítulos posteriores.

FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO RELÉ SEL-T400L

Neste capítulo são apresentados os algoritmos de proteção no domínio do tempo avaliados, que se encontram disponíveis no relé SEL-T400L. Essas funções, as quais se baseiam na teoria das OV's e no princípio das grandezas incrementais, se encontram sob domínio da *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), sendo aplicadas para proteção rápida de LT's.

4.1 ESTRUTURA BÁSICA DO T400L

O diagrama de blocos funcionais e o espectro de frequências associado a cada etapa do processo de aquisição de dados implementado no relé SEL-T400L são ilustrados na Figura 4.1. Do exposto, percebe-se que, inicialmente, os sinais analógicos de corrente de linha e tensão de fase advindos dos transformadores para instrumentos são utilizados como sinais de entrada de um filtro *anti-aliasing* analógico, cujo objetivo é evitar a sobreposição de espectros durante a digitalização destes sinais (PHADKE; THORP, 2009). Após essa filtragem, utiliza-se um conversor analógico-digital (ADC) para digitalizar os sinais a uma frequência de amostragem de 1 MHz.

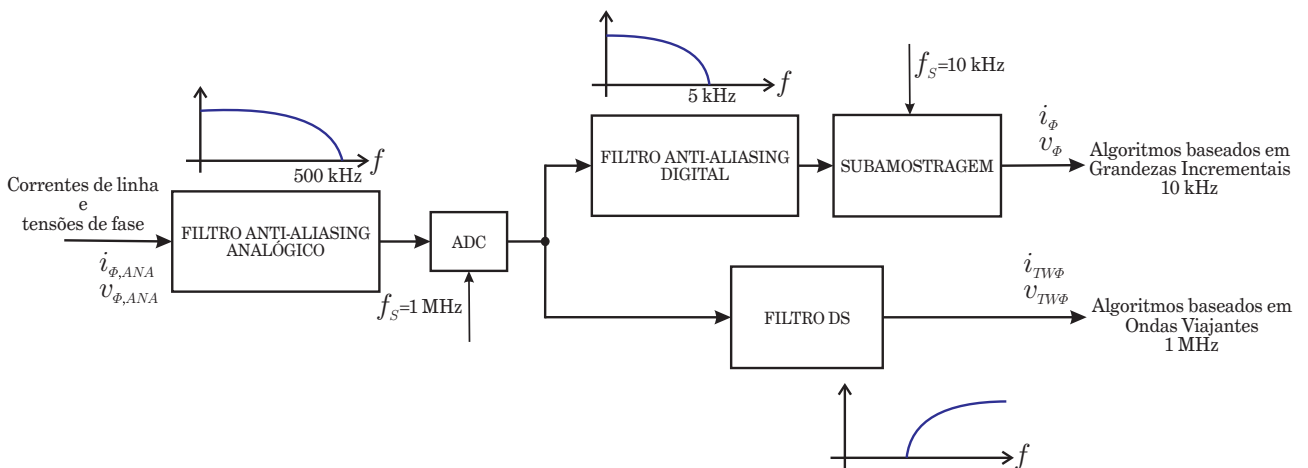


Figura 4.1. Aquisição de dados dos algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo.

Deve-se frisar que o uso de uma taxa de amostragem tão elevada é decorrente da necessidade dos algoritmos baseados na teoria das OV's de terem uma boa resolução no tempo dos sinais avaliados (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Porém, cientes que os algoritmos baseados em grandezas incrementais não requerem uma taxa de amostragem tão elevada quanto as funções baseadas na teoria das OV's, na etapa subsequente, realiza-se o processo de subamostragem dos sinais já digitalizados a 1 MHz para uma frequência de amostragem de 10 kHz. Para tanto, antes da subamostragem, os sinais digitalizados a 1 MHz são utilizados como sinais de entrada de um filtro *anti-aliasing* digital, cujo intuito é evitar a sobreposição de espectros durante a subamostragem dos sinais na nova taxa de amostragem, bem como eliminar as componentes de alta frequência indesejáveis para o cálculo das grandezas incrementais.

Simultaneamente à etapa do filtro *anti-aliasing* digital e da subamostragem, os sinais digitalizados a 1 MHz são filtrados por meio de um filtro denominado *Differentiator-Smoother* (filtro DS), com o objetivo de extrair informações das OV's no sistema monitorado a partir dos sinais de corrente e tensão do medidos. A seguir, são apresentados mais detalhes sobre o filtro DS empregado no relé SEL-T400L.

4.2 FILTRO DS

A extração das OV's de tensão e corrente utilizadas na implementação dos algoritmos de proteção baseados em OV's é realizada por meio do uso do Filtro DS. Trata-se de um filtro composto por duas etapas encadeadas: uma primeira de suavização seguida de uma etapa de diferenciação, conforme apresentado na Figura 4.2.

A etapa de suavização (bloco *Smoother*) é equivalente a um filtro passa-baixa, através do qual os efeitos de distorção dos sinais de corrente e tensão são ligeiramente reduzidos, tornando a borda de subida dos sinais transitórios mais suave (SCHWEITZER *et al.*, 2013). Em contrapartida, na etapa subsequente de diferenciação (bloco *Differentiator*), as mudanças com características próximas a um degrau são transformadas em um pulso com formato triangular. Ao final do processo, são obtidas as OV's de tensão e corrente a serem empregadas nos algoritmos do T400L que se baseiam na análise de OV's induzidas pela falta. Deve-se ressaltar que este processo de filtragem é realizado no domínio do tempo e em tempo real, utilizando-se uma

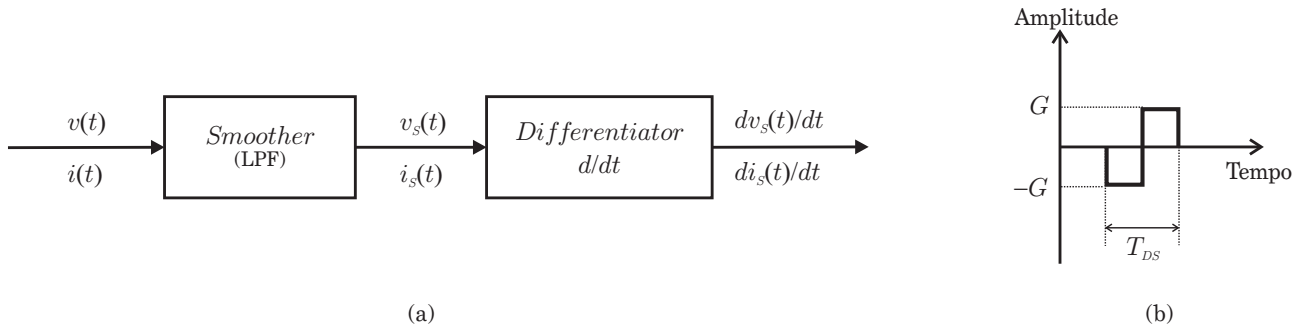


Figura 4.2. Filtro DS: (a) Diagrama de blocos; (b) Janela de dados.

janela de dados contendo os coeficientes do filtro DS com duração T_{DS} , conforme ilustrado na Figura 4.2. Nota-se que a primeira metade dos coeficientes do filtro DS possuem ganho de $-G$, enquanto na outra metade o ganho aplicado é de G .

É importante perceber que os valores de G e T_{DS} não são indicados pela SEL, sendo considerados ajustes de fábrica. Entretanto, é possível supor os ajustes utilizados a partir do entendimento do funcionamento do filtro DS. De fato, nota-se que a resposta do filtro DS, no domínio do tempo, para uma entrada em forma de degrau é uma função triangular, com duração também igual a T_{DS} . Para uma entrada em rampa, o que aconteceria no caso de transitórios amortecidos, a saída do filtro DS se aproxima de uma parábola, também com largura aproximada de T_{DS} , conforme evidenciado na Figura 4.3. Assim, nota-se que sendo o valor de T_{DS} ajustável, é preferível que este resulte em saídas do filtro DS que viabilizem a análise de OV's incidentes e refletidas, mesmo em situações de faltas próximas às barras monitoradas, ou seja, o valor de T_{DS} não pode ser muito elevado.

O instante de tempo relacionado ao pico da saída triangular é tomado como o instante de chegada da OV no terminal monitorado. Conforme indicado na Figura 4.3, este instante de tempo se encontra atrasado em $0,5 \cdot T_{DS}$ segundos do momento exato de incidência das OV's no terminal e é inerente ao processamento de dados associado à extração dessas ondas via filtro DS.

O ganho G do filtro é ajustado pelo fabricante de tal forma que a amplitude da função triangular corresponda à amplitude da entrada em degrau. Dessa forma, ao convoluir os coeficientes do filtro DS dispostos na janela de dados apresentada na Figura 4.2 com a entrada em forma de degrau de amplitude A , obtém-se idealmente uma forma triangular também com amplitude A . Para tanto, o ganho do filtro é ajustado como sendo, $G = \frac{2}{N_{DS}}$, sendo N_{DS} o número de

coeficientes utilizados na implementação do filtro DS empregado.

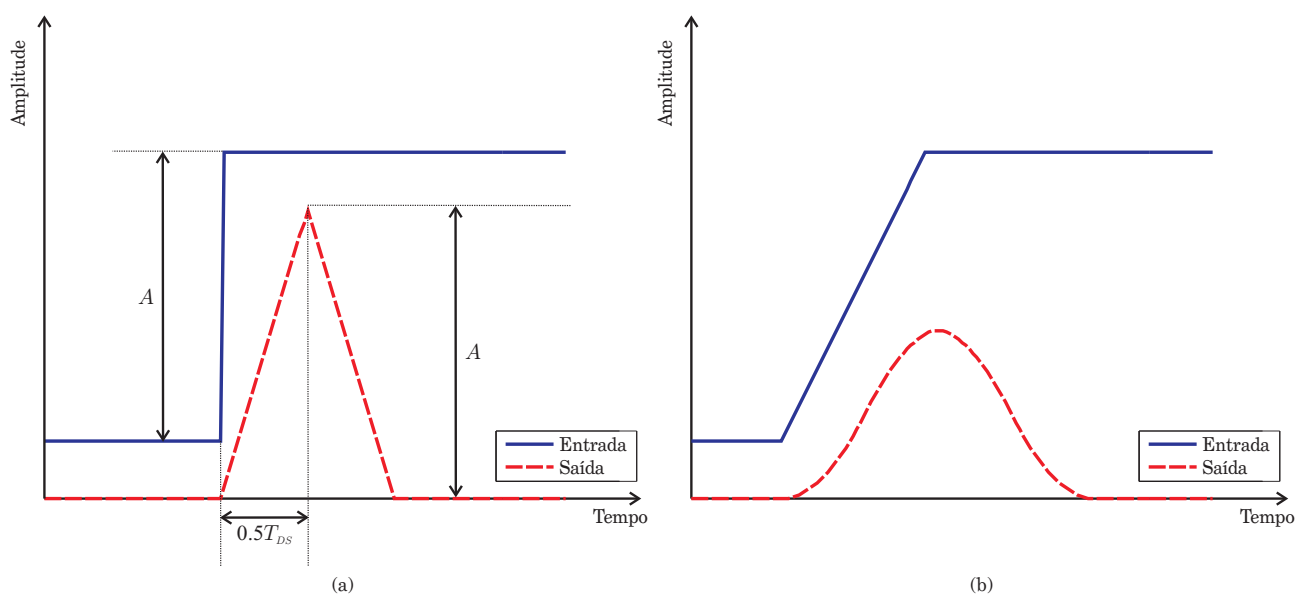


Figura 4.3. Resposta do filtro DS para diferentes sinais de entrada: (a) Degrau; (b) Rampa.

As OV's contidas nos sinais de tensão e corrente do sistema se caracterizam como mudanças bruscas nestes sinais, as quais se aproximam de degraus quando observados em uma escala de tempo da ordem de microssegundos, conforme demonstrado na Figura 4.4. Utilizando-se o ajuste do ganho G mencionado anteriormente, as OV's são medidas respeitando-se as amplitudes e polaridades das variações observadas no sinal monitorado. Essas informações são cruciais para o bom desempenho das funções de proteção baseadas na teoria das OV's disponíveis no T400L.

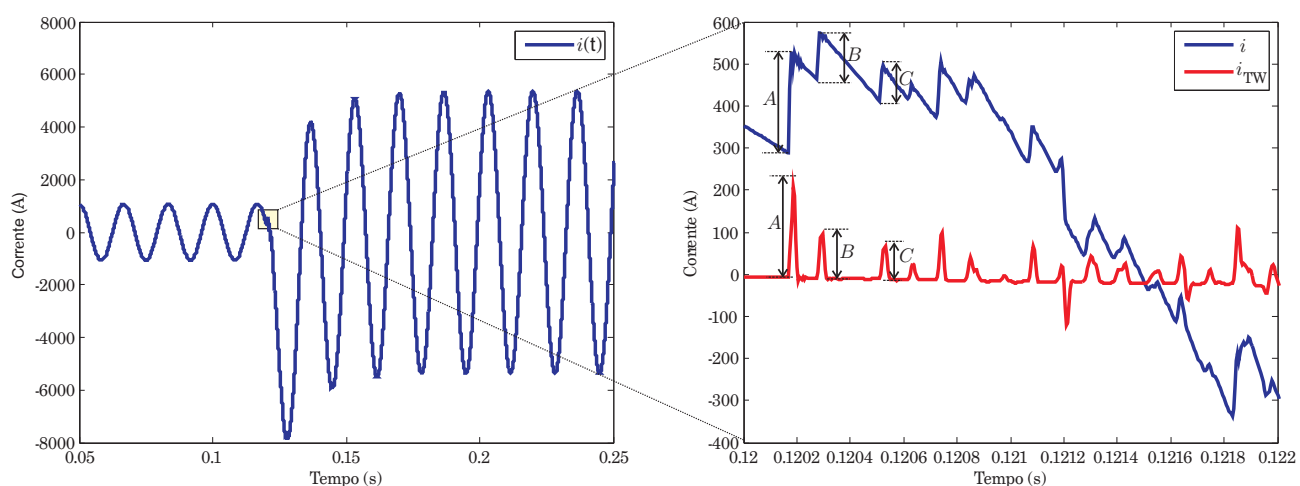


Figura 4.4. Operação de extração das ondas viajantes de corrente a partir do filtro DS.

A frequência de amostragem utilizada nos sinais de entrada do filtro DS influencia a sua resposta em frequência. Na Figura 4.5, apresenta-se o ganho do filtro DS para diferentes taxas

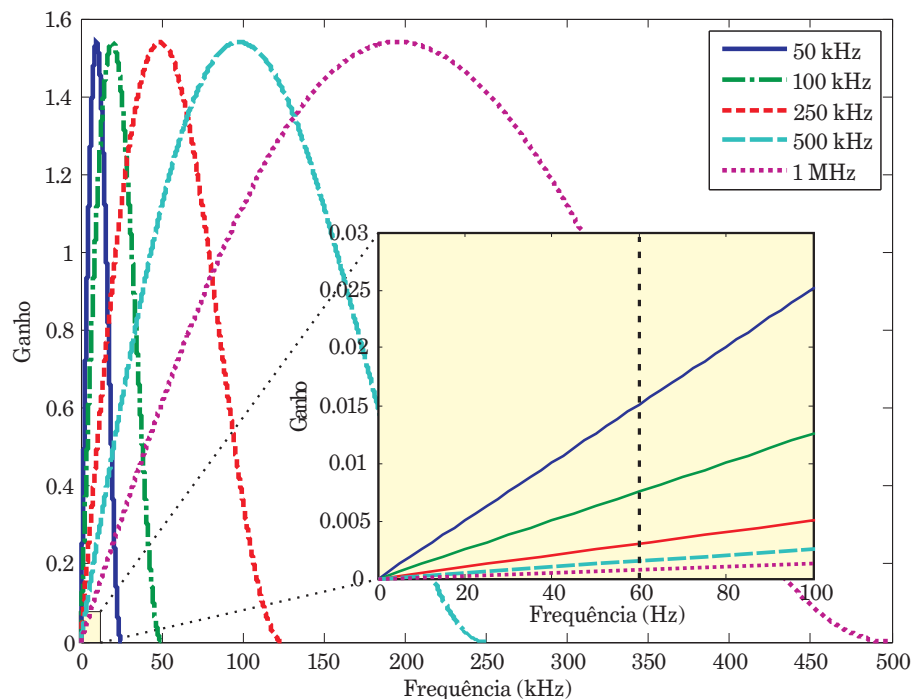


Figura 4.5. Resposta em frequência do filtro DS para diferentes taxas de amostragem.

de amostragem. Do exposto, percebe-se que, quão maior for a taxa de amostragem dos sinais de entrada do filtro DS, melhor a resposta em frequência do filtro, dado que o ganho do filtro é otimizado em uma faixa de frequências características da maioria dos fenômenos geradores de OV. Ainda, destaca-se que quão menor for a frequência de amostragem utilizada, maior será a influência da componente fundamental sobre a onda viajante extraída, conforme demonstrado na parte ampliada da Figura 4.5.

Além da frequência de amostragem, as OV's extraídas por meio do filtro DS também são influenciadas pelo valor adotado para N_{DS} (número de coeficientes do filtro DS), conforme ilustrado na Figura 4.6. Quão maior for o valor de N_{DS} , maior será o espalhamento das saídas triangulares, o que aumenta a possibilidade de perda de informações referentes aos instantes de chegada de frentes de onda subsequentes à primeira incidente. Isto porque, conforme mencionado anteriormente, a estampa de tempo referente à incidência das OV's é dada por $0,5 \cdot T_{DS}$, sendo $T_{DS} = N_{DS} \cdot \Delta t$, onde Δt é o período de amostragem do sinal avaliado.

A partir do exposto na presente seção, conclui-se que o número de amostras utilizadas na janela de dados do filtro DS e a taxa de amostragem dos sinais de entrada devem ser criteriosamente selecionados para que a extração das OV's não prejudique o funcionamento das funções do T400L baseadas na análise OV's.

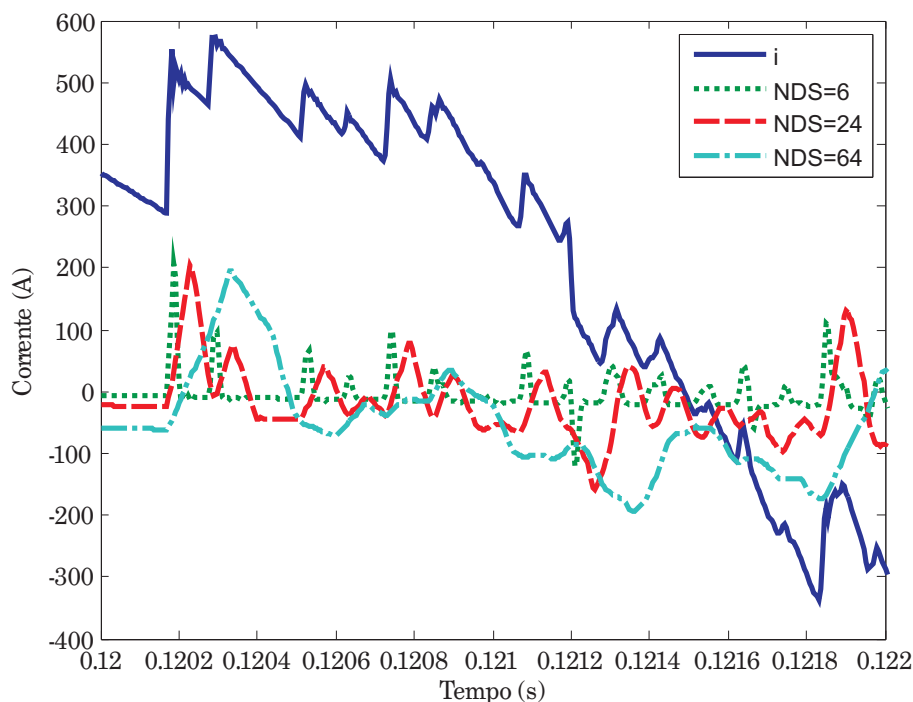


Figura 4.6. Efeito de N_{DS} nas ondas viajantes extraídas.

4.3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

4.3.1 *Time-Domain 32* (TD32)

A função direcional de potência (código ANSI 32) aplicada no domínio do tempo é denominada pela SEL como *Time Domain 32*, ou simplesmente, TD32. Esta função se baseia no princípio das grandezas incrementais e garante proteção unitária para o elemento protegido, quando relés são aplicados nos dois terminais da LT. Neste caso, trata-se de dois elementos de sobrealcance que atuam por meio do esquema de teleproteção *Permissive Overreach Transfer Trip* (POTT). Em resumo, a emissão de *trip* para a abertura dos disjuntores das fases com defeito só é realizada após a confirmação de falta direta pelos relés instalados nas duas pontas da LT monitorada.

Para facilitar a compressão da função TD32, apresenta-se a seguir a descrição das relações entre tensões e correntes para faltas internas e externas à LT em um sistema de potência monofásico.

4.3.1.1 Princípio de Operação da TD32

Na Figura 4.7, encontra-se representado o circuito puro de falta, o qual pode ser considerado a visto que apenas grandezas incrementais são analisadas. Por questões de simplificação, um sistema monofásico RL modelado a parâmetros concentrados é considerado, assumindo que as impedâncias conectadas às barras local e remota representam as impedâncias equivalentes de Thévenin que modelam os sistemas adjacentes à LT em estudo.

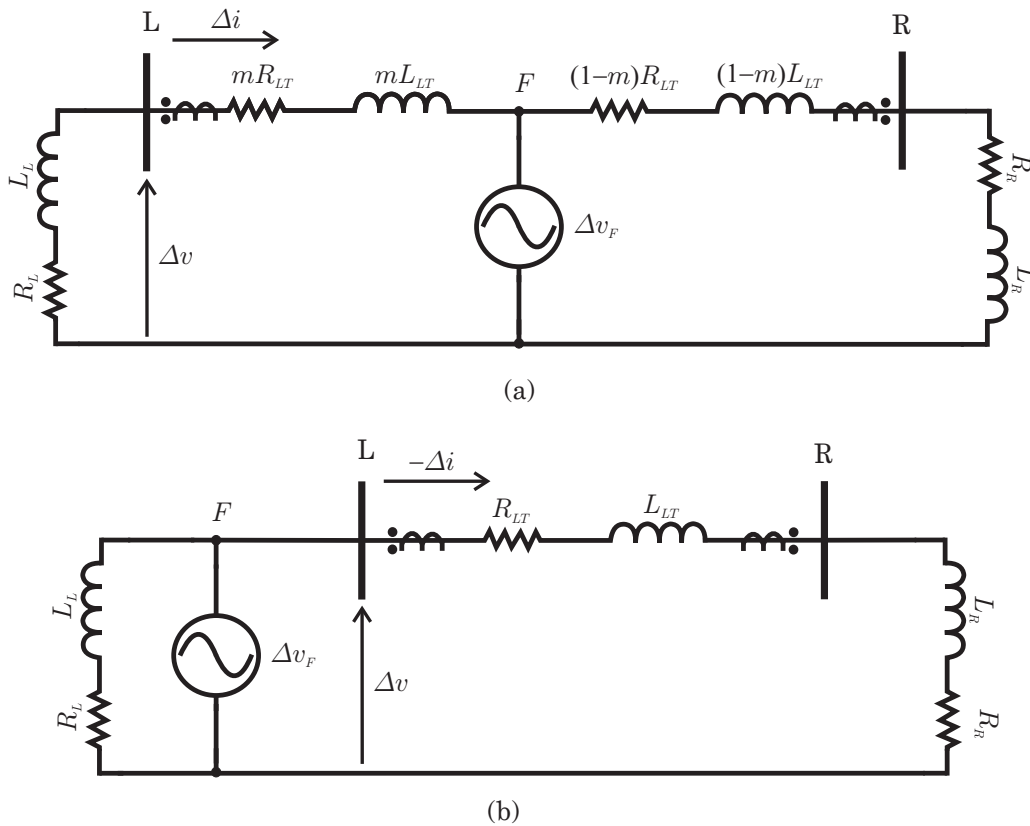


Figura 4.7. Circuito puro de falta e as relações entre tensão e corrente incrementais para uma falta: (a) interna e (b) externa.

Assumindo que relés de proteção se encontram instalados em ambos os terminais da LT e tomando um defeito interno aplicado em no ponto F (Figura 4.7(a)), as relações entre as grandezas incrementais de corrente e tensão do circuito puro de falta para o relé da barra L são dadas por:

$$\Delta v = -(R_L \cdot \Delta i + L_L \cdot \frac{d}{dt} \Delta i) . \quad (4.1)$$

A equação (4.1) pode ser simplificada, sem perda de generalidade, por meio da normalização

da expressão pela impedância RL considerada, resultando em (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$\Delta v = -|Z_L| \cdot \left(\frac{R_L}{|Z_L|} \cdot \Delta i + \frac{L_L}{|Z_L|} \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \right) = -|Z_L| \cdot \Delta i_Z, \quad (4.2)$$

em que Z_L é a impedância do equivalente local de Thevenin e Δi_Z é a corrente réplica incremental, a qual será melhor explicada posteriormente na Seção 4.3.1.2.

De maneira similar pode ser deduzida a relação entre tensões e correntes incrementais para um curto-circuito externo à barra L (Figura 4.7(b)). Para esta análise, deve-se considerar a polaridade do transformador de corrente (TC) ilustrada na figura, resultando em:

$$\Delta v = |Z_{LT} + Z_R| \cdot \Delta i_Z. \quad (4.3)$$

Percebe-se que o uso da corrente réplica permite que as relações entre tensões e correntes incrementais no domínio do tempo ((4.2) e (4.3)) sejam similares àquelas encontradas no domínio da frequência que, para os elementos direcionais de potência baseados na análise de fasores, para as quais as relações entre tensões e correntes incrementais fasoriais são dadas por $-|Z_L| \cdot \Delta \hat{I}$ e $|Z_{LT} + Z_R| \cdot \Delta \hat{I}$, para faltas internas e externas, respectivamente, em que $\Delta \hat{I}$ é o fasor de corrente incremental do sistema (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Deve-se notar que as relações apresentadas em (4.2) e (4.3) apresentam polaridades relativas diferentes para casos de faltas internas ou externas, conforme demonstrado na Figura 4.8. Nesse caso, embora a amplitude dos sinais seja também importante, é esta polaridade relativa que determinará a direcionalidade do defeito.

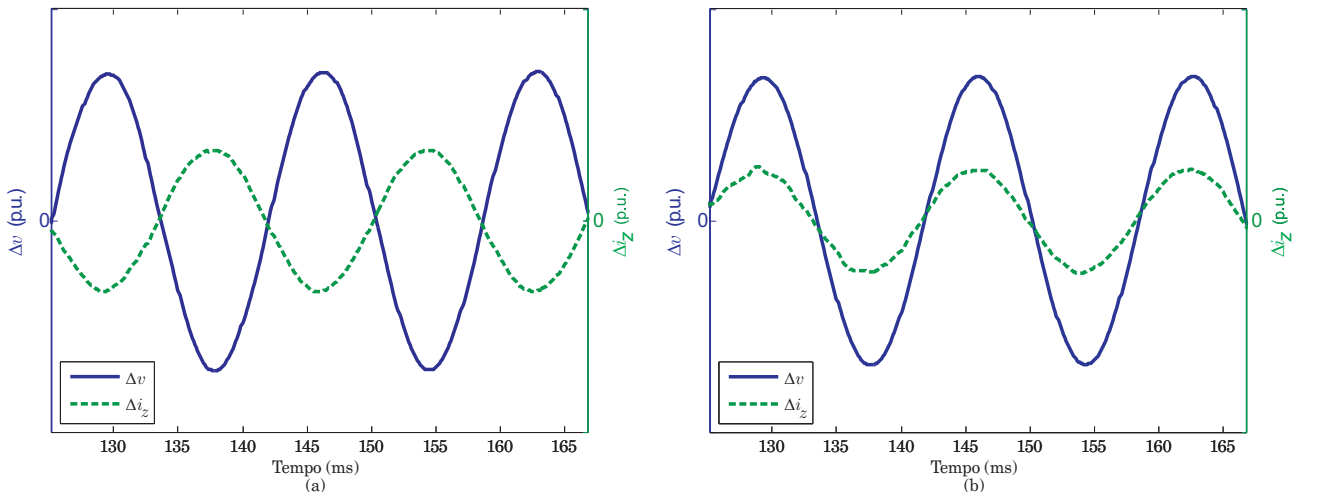


Figura 4.8. Relações entre tensões e correntes incrementais para faltas internas (a) e externas (b).

Utilizando as relações entre tensões e correntes incrementais obtidas para faltas diretas e reversas, define-se então para a TD32 um torque de operação como sendo o negativo do produto entre tensão incremental e corrente réplica incremental (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$T_{OP}(t) = -\Delta v(t) \cdot \Delta i_Z(t) , \quad (4.4)$$

de modo que $T_{OP}(t)$ é positivo para faltas diretas e negativo para faltas reversas.

Para obter os valores esperados de $T_{OP}(t)$ para faltas diretas e reversas, (4.2) e (4.3) são substituídas em (4.4). Assim, para faltas diretas, tem-se que:

$$T_{OP}(t) = |Z_L| \cdot (\Delta i_Z(t))^2 , \quad (4.5)$$

enquanto que, para faltas reversas, tem-se que:

$$T_{OP}(t) = -|Z_{LT} + Z_R| \cdot (\Delta i_Z(t))^2 . \quad (4.6)$$

Assim sendo, é possível obter um elemento de operação capaz de indicar a direcionalidade do curto-circuito por meio do produto apresentado em (4.4). De fato, idealmente, para declarar faltas internas ou externas, bastaria realizar uma simples comparação do torque de operação com o valor zero. Entretanto, devido às distorções que podem existir nos sinais de tensão e corrente em SEEs reais, tal avaliação não é confiável. Portanto, para garantir segurança à função TD32 frente às mais diversas condições de operação dos SEEs, são definidos limiares adaptativos, os quais são representados matematicamente por (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$T_{FWD}(t) = Z_{FWD} \cdot (\Delta i_Z(t))^2 + \Delta_{MIN} \quad (4.7)$$

$$T_{REV}(t) = -Z_{REV} \cdot (\Delta i_Z(t))^2 - \Delta_{MIN} \quad (4.8)$$

em que Δ_{MIN} é um limiar mínimo cujo objetivo é garantir segurança da TD32 mesmo perante desequilíbrios e defasagens espúrias entre os valores instantâneos dos sinais de corrente e tensão usados no cálculo de T_{OP} , e Z_{FWD} e Z_{REV} são impedâncias de ajuste do relé SEL-T400L, sendo definidas como uma parcela da impedância vista pelo relé para faltas diretas e reversas, respectivamente, conforme demonstrado a seguir:

$$Z_{FWD} = A \cdot |Z_{L(MIN)}| , \quad (4.9)$$

$$Z_{REV} = A \cdot |Z_{LT}| , \quad (4.10)$$

onde $0 < A < 1$ e $Z_{L(MIN)}$ é a menor impedância possível para o equivalente local de Thévenin do sistema apresentado na Figura 4.7. Esta impedância pode ser calculada tomando como referência o valor do *Source Impedance Ratio* (SIR) no referido terminal, usando:

$$SIR = \frac{Z_L}{Z_{LT}} , \quad (4.11)$$

$$Z_{L(MIN)} = SIR_{MIN} \cdot Z_{LT} . \quad (4.12)$$

Dessa forma, o elemento direcional de potência declara faltas diretas quando:

$$T_{OP}(t) > T_{FWD}(t) , \quad (4.13)$$

e faltas reversas quando:

$$T_{OP}(t) < T_{REV}(t) . \quad (4.14)$$

Se as condições (4.13) e (4.14) não forem satisfeitas, assume-se que o SEE está operando em condições normais.

Na Figura 4.9, mostra-se o comportamento de T_{OP} , T_{FWD} e T_{REV} para uma falta direta e para uma falta reversa. Nota-se que a margem entre T_{OP} e T_{REV} cresce para faltas internas à LT, garantido segurança à proteção. Além disso, para faltas externas, a margem entre T_{OP} e T_{FWD} também se eleva, melhorando a confiabilidade do elemento direcional (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Como resultado, a direção da falta é rapidamente identificada com precisão, confiabilidade e segurança.

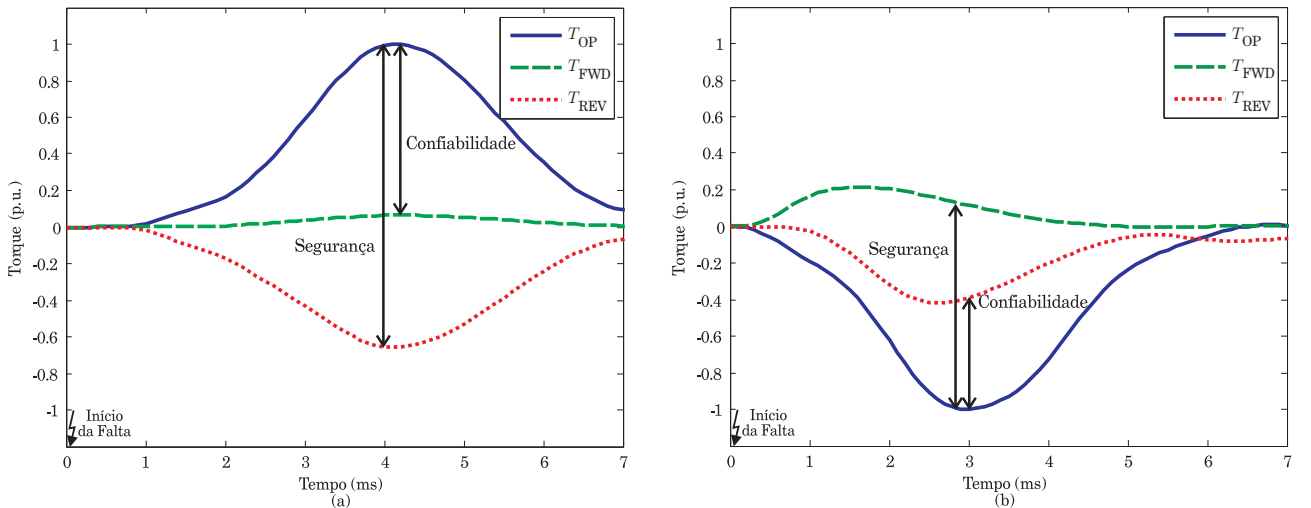


Figura 4.9. T_{OP} , T_{FWD} e T_{REV} para uma falta: (a) interna (b) externa.

Deve-se destacar que, na TD32, o efeito capacitivo das LTs é desprezado, de modo que o sistema é modelado basicamente como uma rede RL. Essa aproximação permite a realização de simplificações nos procedimentos matemáticos do T400L, sem perdas relevantes de confiabilidade para LTs com comprimento convencional (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

4.3.1.2 Corrente Réplica Incremental

Os benefícios da corrente réplica sobre as funções do T400L baseadas em elementos incrementais se tornam mais claros após a introdução dos conceitos relacionados à função TD32 e da função TD21, a qual será descrita posteriormente. Por isso, esperou-se até este momento para apresentar maiores detalhes sobre esta corrente.

Em sua forma geral, o equacionamento da corrente réplica incremental pode ser representado por (SCHWEITZER *et al.*, 2014):

$$\Delta i_Z = f_{IZ}(\Delta i, R, L) \quad (4.15)$$

sendo:

$$f_{IZ}(\Delta i, R, L) = D_0(R, L) \cdot \Delta i + D_1(R, L) \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \quad (4.16)$$

onde:

$$D_0 = \frac{R}{|Z|}, D_1 = \frac{L}{|Z|}, \quad (4.17)$$

em que Z , R e L são a impedância, a resistência e a indutância da impedância RL que representa o SEE monitorado.

A partir de (4.16), percebe-se que a corrente réplica incremental é a soma da queda de tensão provocada por Δi na resistência e indutância do equivalente RL do sistema. Além disso, as constantes D_0 e D_1 são ajustadas de maneira apropriada para que a corrente réplica possua ganho unitário na frequência fundamental do sistema.

Na Figura 4.10, encontram-se representadas as correntes incremental e réplica incremental. A partir desta figura, percebe-se que a corrente réplica apresenta ganho unitário, conforme mencionado anteriormente. Ainda, por ser resultante de uma queda de tensão em um circuito RL, o atraso observado nas correntes em relação as tensões dos sistemas indutivos, tais como os sistemas elétricos de potência, é reduzido de forma significativa na corrente réplica. Somado a

esses fatores, pode-se dizer que o cálculo da corrente réplica incremental se assemelha à aplicação do filtro mímico, o que torna as correntes réplica imunes à componente CC de decaimento exponencial característica dos sistemas indutivos (RIBEIRO *et al.*, 2016).

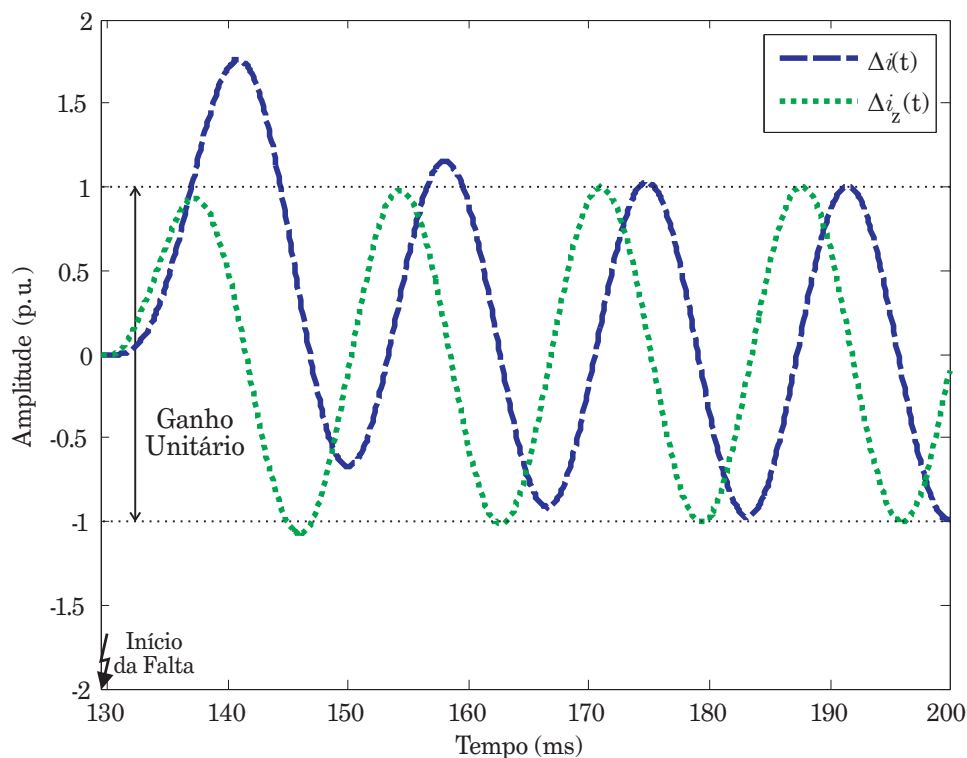


Figura 4.10. Correntes incremental e réplica incremental.

O uso da corrente réplica incremental também possibilita aos elementos direcionais descritos na Seção 4.3.1.1 uma indicação de falta mais precisa. Na Figura 4.11, encontram-se representadas a tensão incremental e as correntes incremental e réplica incremental para uma falta externa à LT de um SEE. Percebe-se que, após o início da falta, a tensão e a corrente incrementais não indicam de forma precisa a direção do defeito, ou seja, ora se verifica uma relação de curto direto (tensões e correntes incrementais com sinais opostos) ora se verifica uma relação para curto reverso (tensões e correntes incrementais com mesmo sinal). Esta alternância é observada nos instantes em que a tensão incremental e corrente incremental cruzam o zero, sendo este efeito reduzido quando do uso da corrente réplica incremental.

Para melhor exemplificar tal problemática, apresentam-se na Figura 4.12 as regiões relativas à indicação de curtos diretos e reversos para uma falta reversa quando o torque de operação é calculado com e sem a corrente réplica. Do exposto, confirma-se o comportamento esperado, no qual, mesmo sendo uma falta reversa, indica-se em boa parte do ciclo fundamental dos sinais

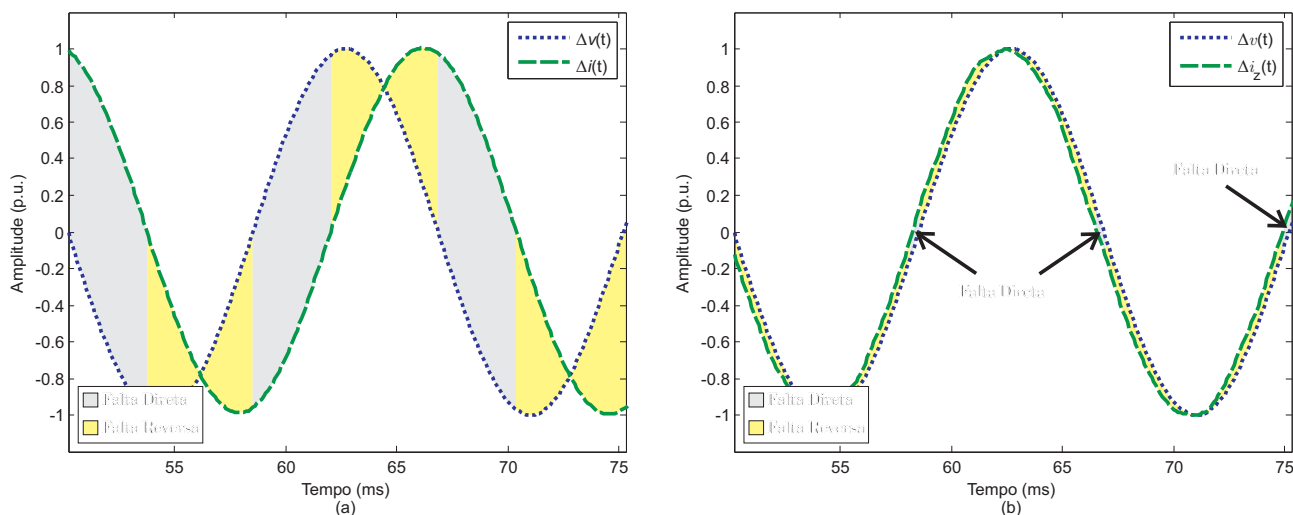


Figura 4.11. Grandezas incrementais para uma falta reversa: (a) Tensão e corrente incrementais e (b) Tensão incremental e corrente réplica incremental.

um curto direto. Por outro lado, quando utilizada a corrente réplica, este problema é reduzido sobremaneira, de modo que apenas em um pequeno trecho do ciclo fundamental é verificada uma indicação de curto direto. Ainda assim, este pequeno trecho de indicação incorreta da direcionalidade da falta ainda merece atenção, fazendo-se necessário o uso de uma margem de segurança (MS), conforme a apresentada na Figura 4.12. De fato, a margem de segurança MS é equivalente ao Δ_{MIN} utilizado nos limiares adaptativos descritos na Seção 4.3.1.1, a qual confere confiabilidade à proteção durante a identificação da direcionalidade do defeito.

É importante ressaltar que, além dos benefícios mencionados até então, o uso da corrente réplica Δi_z permite que as relações matemáticas aplicadas nas funções baseadas em grandezas incrementais se assemelhem àquelas observadas em algoritmos tradicionais aplicados domínio da frequência.

4.3.1.3 Considerações para Sistemas Trifásicos: os Loops de Falta

Até a seção anterior, os elementos direcionais apresentados foram empregados somente a sistemas monofásicos para fins de demonstração dos fundamentos. Todavia, quando aplicados em sistemas trifásicos, o uso de loops de faltas é necessário para viabilizar atuações corretas para todos os tipos de curto-circuito que possam ocorrer em um SEE, a saber: monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos.

Na proteção tradicional de LTs, correntes e tensões para cada loop de falta se relacionam

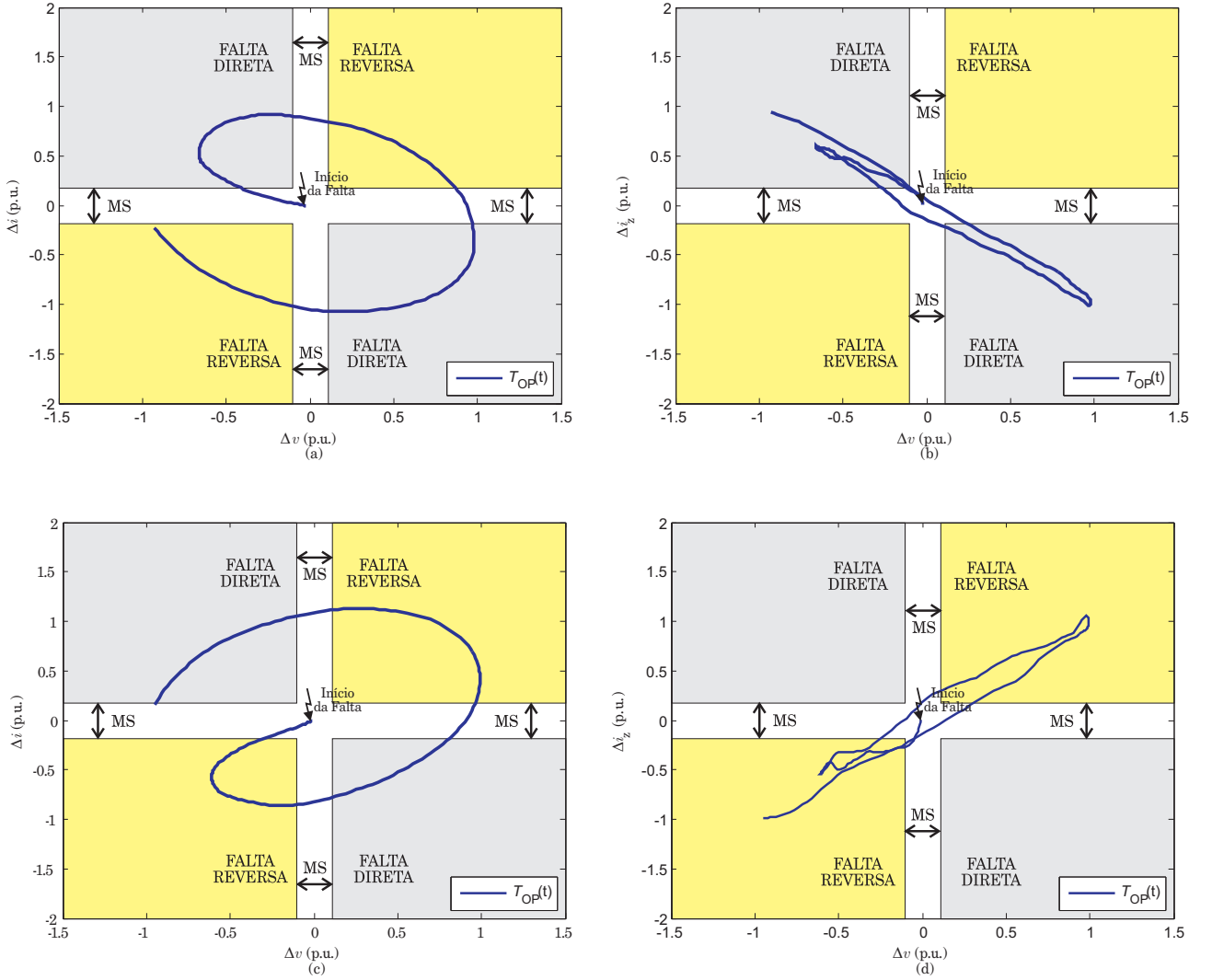


Figura 4.12. $T_{OP}(t)$ obtido a partir do negativo do produto entre tensão incremental e: (a) Corrente incremental e (b) Corrente réplica incremental, para falta interna; (c) Corrente incremental e (d) Corrente réplica incremental, para falta externa.

entre si por meio da impedância de sequência positiva da LT. No entanto, para os algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo, tensões e corrente para cada loop de falta são relacionadas a partir da magnitude desta impedância, incluindo informações de fase em separado para cada sinal (KASZTENNY *et al.*, 2016).

Dessa forma, considerando-se uma falta monofásica do tipo AT sólida incidente em um ponto cuja distância da barra L é m p.u. do comprimento da LT, conforme apresentado na Figura 4.13, obtém-se a seguinte relação:

$$\widehat{V}_1 + \widehat{V}_2 + \widehat{V}_0 = m \cdot (Z_1 \cdot \widehat{I}_1 + Z_2 \cdot \widehat{I}_2 + Z_0 \cdot \widehat{I}_0), \quad (4.18)$$

onde os subscritos 0, 1 e 2 representam as componentes de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

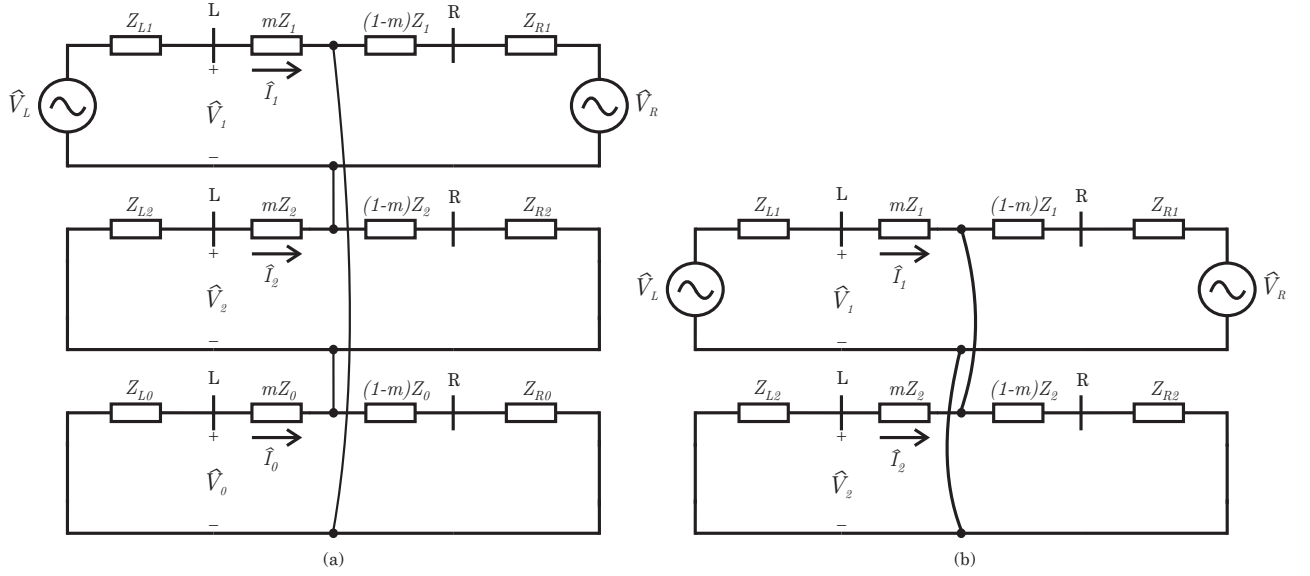


Figura 4.13. Componentes de sequência para: (a) Falta AT e (b) Falta BC.

A partir de (4.18), podem ser obtidos os loops de corrente e tensão para uma falta AT em termos dos fasores medidos, admitindo-se sequência de fases positiva:

$$\begin{aligned}\widehat{V}_A &= m \cdot (Z_1 \cdot \widehat{I}_1 + Z_1 \cdot \widehat{I}_2 + Z_1 \cdot \widehat{I}_0 - Z_1 \cdot \widehat{I}_0 + Z_0 \cdot \widehat{I}_0), \\ \widehat{V}_A &= m \cdot (Z_1 \cdot \widehat{I}_A - (Z_1 - Z_0) \cdot \widehat{I}_0), \\ \widehat{V}_A &= m \cdot Z_1 \cdot \left[\widehat{I}_A - \left(1 - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \cdot \widehat{I}_0 \right] = m \cdot Z_1 \cdot \widehat{I}_{AT},\end{aligned}\quad (4.19)$$

em que \widehat{I}_{AT} e \widehat{V}_A são a corrente e a tensão de loop para uma falta AT, respectivamente.

Utilizando a relação expressa em (4.19) e sabendo que $Z_1 = |Z_1| \cdot 1\angle Z_1$, a corrente réplica de loop \widehat{I}_{ZAT} é obtida:

$$\widehat{V}_A = m \cdot |Z_1| \cdot \left[\widehat{I}_A \cdot 1\angle Z_1 - \left(1 - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \cdot \widehat{I}_0 \cdot 1\angle Z_1 \right] = m \cdot |Z_1| \cdot \widehat{I}_{ZAT}, \quad (4.20)$$

sendo:

$$\widehat{I}_{ZAT} = \widehat{I}_A \cdot 1\angle Z_1 - \left(1 - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \cdot \widehat{I}_0 \cdot 1\angle Z_1. \quad (4.21)$$

Ajustando \widehat{I}_{ZAT} em (4.21) em termos de módulo e fase das impedâncias de sequência positiva e zero da LT, obtém-se:

$$\widehat{I}_{ZAT} = \widehat{I}_A \cdot 1\angle Z_1 - \widehat{I}_0 \cdot \left(1\angle Z_1 - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot 1\angle Z_0 \right). \quad (4.22)$$

Como consequência, (4.22) pode ser reescrita em forma de função no domínio do tempo na forma a seguir (KASZTENNY *et al.*, 2016):

$$i_{ZAT} = f_{IZ}(i_A, R_1, L_1) - \left[f_{IZ}(i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(i_0, R_0, L_0) \right]. \quad (4.23)$$

A partir do exposto em (4.23), pode-se obter a corrente réplica incremental de loop para uma falta AT em termos das componentes de sequência da rede elétrica em análise:

$$\Delta i_{ZAT} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_1, L_1) - \left[f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0) \right] . \quad (4.24)$$

De forma similar às faltas monofásicas, podem ser obtidas as tensões e correntes de loop para as unidades de medição bifásicas. Assumindo uma falta bifásica do tipo BC sólida incidente em um ponto cuja distância da barra L é m p.u. do comprimento da LT, conforme apresentado na Figura 4.13, obtém-se:

$$\begin{aligned} \widehat{V}_1 - m \cdot Z_1 \cdot \widehat{I}_1 &= \widehat{V}_2 - m \cdot Z_2 \cdot \widehat{I}_2 , \\ \widehat{V}_1 - \widehat{V}_2 &= m \cdot Z_1 \cdot (\widehat{I}_1 - \widehat{I}_2) . \end{aligned} \quad (4.25)$$

Considerando-se uma sequência de fases positiva, (4.25) se reduz a:

$$\begin{aligned} \widehat{V}_B - \widehat{V}_C &= m \cdot Z_1 \cdot (\widehat{I}_B - \widehat{I}_C) , \\ \widehat{V}_{BC} &= m \cdot Z_1 \cdot \widehat{I}_{BC} , \end{aligned} \quad (4.26)$$

onde \widehat{I}_{BC} e \widehat{V}_{BC} são a corrente e a tensão de loop fase-fase para uma falta BC, respectivamente.

Assim, novamente, sabendo que $Z_1 = |Z_1| \cdot 1\angle Z_1$, pode-se obter a tensão e a corrente réplica de loop para uma falta BC, ou seja, \widehat{V}_{ZBC} e \widehat{I}_{ZBC} , respectivamente:

$$\begin{aligned} \widehat{V}_{ZBC} &= m \cdot |Z_1| \cdot \widehat{I}_{BC} \cdot 1\angle Z_1 , \\ \widehat{V}_{BC} &= m \cdot |Z_1| \cdot \widehat{I}_{ZBC} , \end{aligned} \quad (4.27)$$

sendo:

$$\widehat{I}_{ZBC} = \widehat{I}_B \cdot 1\angle Z_1 - \widehat{I}_C \cdot 1\angle Z_1 . \quad (4.28)$$

Dessa forma, pode-se converter (4.28) para o domínio do tempo, resultando em (KASZTENNY *et al.*, 2016):

$$i_{ZBC} = f_{IZ}(i_B, R_1, L_1) - f_{IZ}(i_C, R_1, L_1) . \quad (4.29)$$

Em termos incrementais, (4.29) é dada por:

$$\Delta i_{ZBC} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_1, L_1) - f_{IZ}(\Delta i_C, R_1, L_1) . \quad (4.30)$$

Assim sendo, considerando o exposto, procedimentos análogos podem ser realizados para obtenção das demais tensões e correntes de loop para as unidades de fase-terra e fase-fases típicas de sistemas de proteção, as quais contemplam todos os tipos de falta em SEEs. Os sinais de loop a serem considerados são apresentados na Tabela 4.1. Enfatiza-se que durante a ocorrência de faltas trifásicas, qualquer um dos loops apresentados pode ser utilizado, visto que todos são sensibilizados (KASZTENNY *et al.*, 2016).

Tabela 4.1. Loop de tensões e correntes incrementais no domínio do tempo

Loop	Tensão, Δv	Corrente Réplica, Δi_Z
AT	Δv_A	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{0Z}$
BT	Δv_B	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{0Z}$
CT	Δv_C	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{0Z}$
AB	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{BZ}$
BC	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{CZ}$
CA	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{AZ}$

Para a análise de cada um dos loops de falta presentes apresentados na Tabela 4.1, utilizam-se as seguintes funções:

$$\Delta i_0 = \frac{1}{3}(\Delta i_A + \Delta i_B + \Delta i_C) \quad (4.31)$$

$$\Delta i_{0Z} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0) \quad (4.32)$$

$$\Delta i_{AZ} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_1, L_1) \quad (4.33)$$

$$\Delta i_{BZ} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_1, L_1) \quad (4.34)$$

$$\Delta i_{CZ} = f_{IZ}(\Delta i_C, R_1, L_1) \quad (4.35)$$

em que R_1 , R_0 , L_1 , L_0 , Z_1 e Z_0 são as resistências, indutâncias e impedâncias de sequência positiva e zero da LT, respectivamente, e f_{IZ} é obtida conforme apresentado em (4.16).

Até a presente seção foram apresentadas as relações entre tensões e correntes incrementais da TD32 para faltas diretas e reversas à LT, os benefícios de uso da corrente réplica incremental e suas características e o princípio de funcionamento e a aplicação em sistemas trifásicos dos elementos direcionais. Agora, é necessário apresentar o cálculo de todas as variáveis relacionadas à TD32 e a lógica de operação desta função conforme implementada no dispositivo de proteção.

4.3.1.4 Implementação das Lógicas da TD32

Na Figura 4.14 é apresentada a lógica de cálculo dos torques para as tensões e correntes incrementais utilizadas na função TD32. Das correntes medidas i_ϕ , são calculadas as correntes incrementais Δi_ϕ fazendo uso do BUFFER₂ para $p = 1$ (número de ciclos de atraso para cálculo da grandeza incremental). Essas correntes, são utilizadas para prover um reforço inicial em velocidade e segurança no torque de operação da função TD32 (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Além disso, correntes réplica i_Z dos sinais de corrente medidos são calculados para cada um dos loops de falta apresentados anteriormente. Na sequência, fazendo uso do BUFFER₁ para $p = 1$, obtêm-se as correntes réplicas incrementais para os loops de falta. Finalmente, para controle dos transitórios eletromagnéticos presentes nas correntes réplica incrementais, aplica-se um filtro passa-baixas com frequência de corte em aproximadamente 1 kHz (SCHWEITZER *et al.*, 2015), obtendo-se Δi_Z , que será utilizada no cálculo da lógica de operação da TD32.

O procedimento para obtenção das tensões incrementais é similar. Δv_ϕ é calculado para o reforço inicial no torque de operação da função TD32 e as tensões incrementais de loop Δv são calculadas para uso nas lógicas de operação da função direcional.

O procedimento de cálculo do torque de operação T_{OP} e dos torques de restrição T_{FWD} e T_{REV} é apresentado na Figura 4.15. Em conformidade com o mencionado na Seção 4.3.1.1, T_{OP} é obtido a partir do produto do negativo da tensão incremental com a corrente réplica incremental. Já os torques de restrição são calculados a partir das relações matemáticas apresentadas anteriormente em função de Δi_Z , Z_{FWD} e Z_{REV} . Adicionalmente, baseando-se no princípio de que o produto das correntes e tensões incrementais de fase indicam de forma correta a direcionalidade do curto-circuito durante os primeiros instantes de falta, conforme apresentando

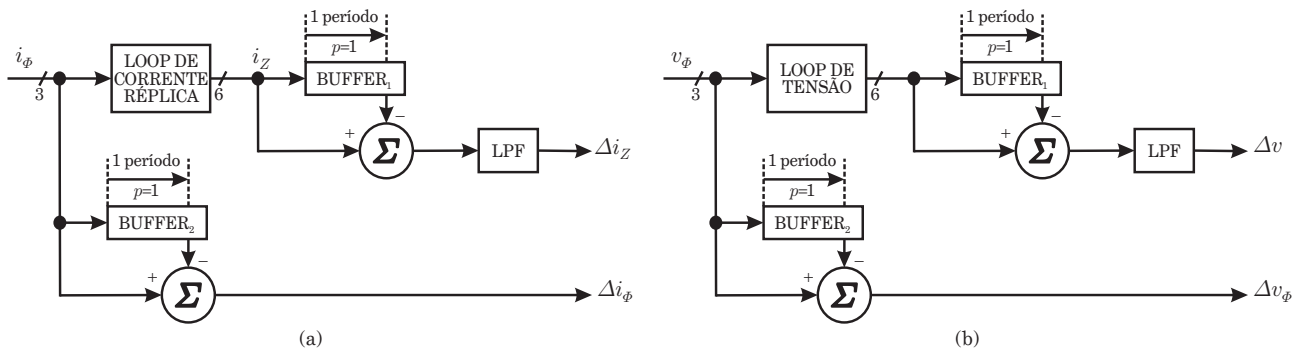


Figura 4.14. Cálculos das grandezas incrementais de corrente (a) e tensão (b) utilizadas na TD32.

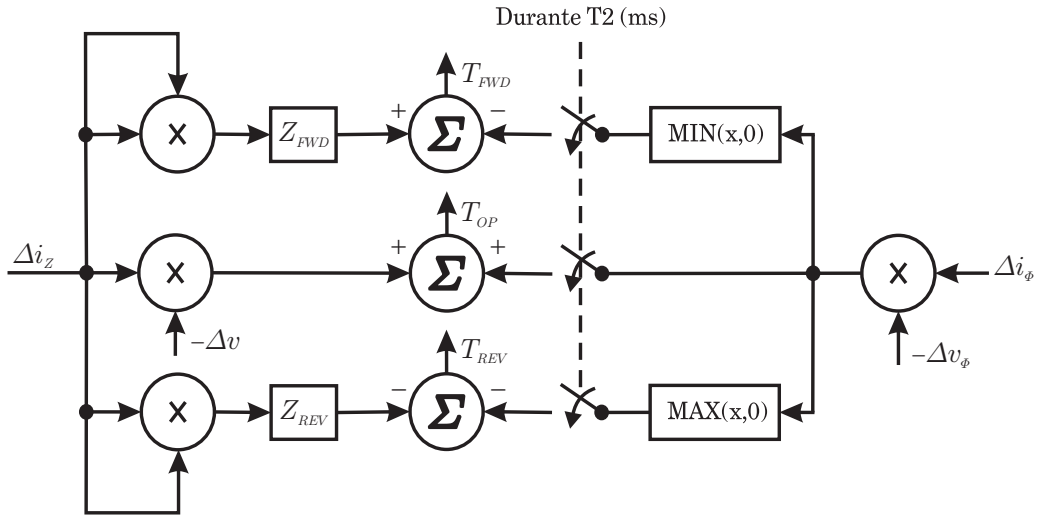


Figura 4.15. Cálculo dos torques da TD32.

anteriormente na Figura 4.12, é obtido um reforço inicial no torque de operação da TD32, o qual é aplicado por um período de tempo T_2 ms. Esse reforço inicial, além de garantir segurança aos elementos direcionais para faltas externas, acelera a proteção para faltas internas e somente é aplicado por frações de milissegundos após o início do distúrbio (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Por fim, a lógica apresentada na Figura 4.15 é então aplicada em cada um dos seis loops de falta possíveis.

Na lógica de operação da função TD32 (Figura 4.16), os torques T_{OP} , T_{FWD} e T_{REV} são integrados e, aos torques de restrição, após a integração, são aplicadas margens de segurança. Para declarar a direção da falta, os torques de restrição integrados E_{FWD} e E_{REV} são comparados com o torque integrado de operação E_{OP} . Assim, a função identifica uma falta direta quando $E_{OP} > E_{FWD}$ e reversa quando $E_{OP} < E_{REV}$. Para este último caso, o relé ativa diretamente a *word bit* para evento externo à LT, $TD32_{REV}$, bloqueando a operação do dispositivo.

Com a intenção de diferenciar fenômenos transitórios relacionados a chaveamentos de banco de capacitores ou de reatores daqueles relacionados a faltas, a TD32 possui uma supervisão por sobrecorrente para concluir se, de fato, o fenômeno transitório capturado pelo dispositivo de proteção é referente a um curto-circuito. Se assim for confirmado, a função detecta a presença de falta na LT e ativa a *word bit* $TD32_{FWD}$. A partir da comunicação dos relés presentes nos terminais da LT, é tomada a decisão de emissão de *trip* aos disjuntores associados, conforme apresentado na Figura 4.17. A lógica de operação apresentada na Figura 4.16 é executada para os seis loops de falta possíveis, muito embora apenas um seja habilitado para análise a partir

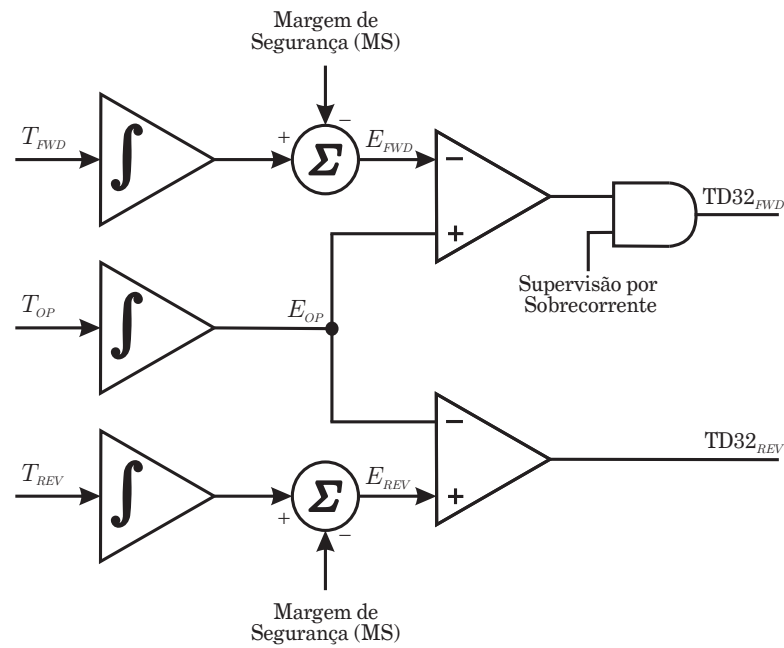


Figura 4.16. Lógica de operação da TD32.

de um procedimento de seleção de fases.

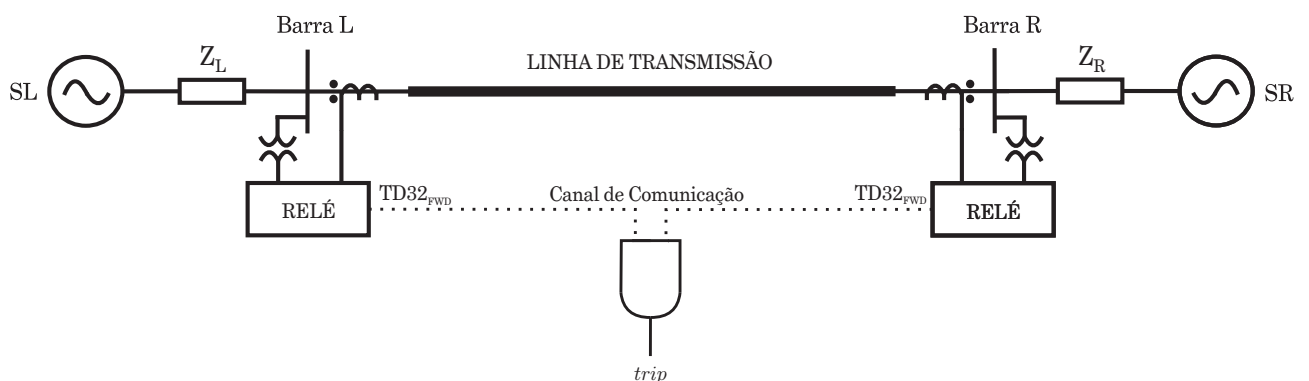


Figura 4.17. Acionamento de disjuntor (*trip*) a partir da TD32.

Com o objetivo de reduzir os esforços computacionais do relé, é utilizada uma lógica denominada *Starting Element*, a qual identifica a ocorrência de distúrbios de qualquer natureza na LT monitorada e serve como ferramenta auxiliar para o processo de seleção de fases e supervisão por sobrecorrente.

Perante o exposto na presente seção, é necessário entender os princípios de funcionamento das lógicas de supervisão por sobrecorrente, de seleção de fases e do *Starting Element*, os quais são abordadas a seguir.

4.3.1.5 *Starting Element*, Supervisão por Sobrecorrente e Seleção de Fases

O dispositivo T400L utiliza uma lógica de supervisão não-direcional para inicializar os cálculos das lógicas de operação das funções de proteção baseadas em grandezas incrementais (SEL, 2016). Assumindo o uso das tensões e correntes incrementais no terminal local (barra L), a lógica do *Starting Element* estima a tensão incremental em um ponto cuja distância do relé seja equivalente à impedância da LT, conforme apresentado na Figura 4.18. A variável lógica referente ao *Starting Element* é selada quando a tensão incremental estimada for maior do que uma tensão de limiar mínima, ou seja, quando for satisfeita a condição descrita em (4.36). Estes cálculos são realizados para todos os loops de falta apresentados anteriormente.

$$|\Delta v| + |Z_x| \cdot |\Delta i_z| > \Delta v_{\text{START_LIM}} , \quad (4.36)$$

em que $\Delta v_{\text{START_LIM}}$ é um valor mínimo de variação de tensão.

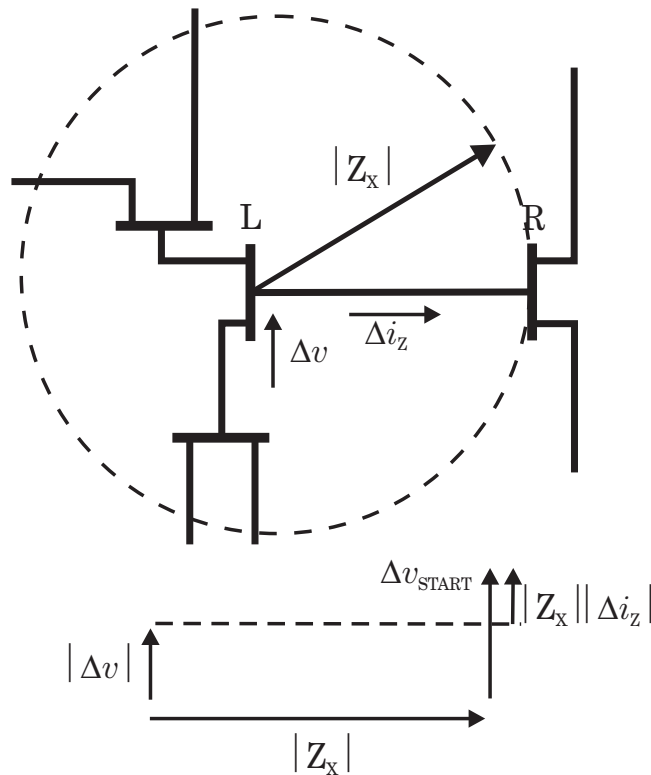


Figura 4.18. Lógica do *Starting Element* (SEL, 2016).

Com o intuito de realizar a seleção de fases, comparam-se as variações de tensões do *Starting Element* obtidas para todos os loops de falta. Como regra geral, o loop que apresentar a maior variação é o relacionado ao defeito (SEL, 2016), conforme demonstrado na Figura 4.19, na qual são apresentadas as variações calculadas para os loops de falta considerando um curto-circuito

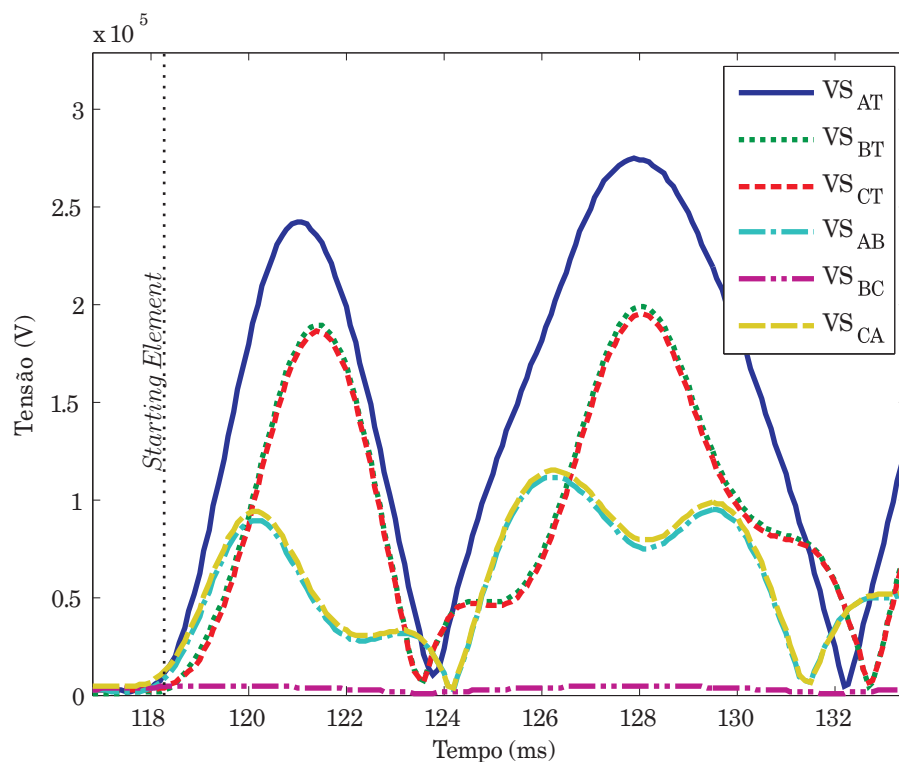


Figura 4.19. Seleção de Fases: variação de tensão dos loops de falta para uma falta AT franca.

monofásico AT franco interno à LT monitorada. Embora não seja especificado pelo fabricante do dispositivo de proteção o instante de tempo em que a seleção de fases é realizada, acredita-se que esta ocorre no momento em que sobrecorrentes relevantes nas grandezas incrementais são verificadas. Para tanto, utiliza-se a lógica de supervisão por sobrecorrente, na qual apenas valores instantâneos das correntes réplica são avaliados.

A supervisão por sobrecorrente tem como objetivo diferenciar curtos-circuitos de outros eventos resultantes de chaveamentos, por exemplo. Para esta função, uma curva de corrente de pickup é obtida a partir da integral do valor médio de uma função $|\Delta i_Z|$ genérica, cujo valor de pico é igual à corrente de pickup ajustada no dispositivo. Assim, as correntes réplica dos loops de falta são integradas tão logo o *Starting Element* é ativado. Então, comparando os valores da corrente réplica integrada e da curva de pickup, é possível identificar sobrecorrentes de forma rápida e segura, conforme ilustrado na Figura 4.20. Assim, em casos nos quais a corrente réplica integrada excede a curva de pickup, ativa-se a *word bit* referente à sobrecorrente, a qual é empregada nas lógicas das funções de proteção do T400L.

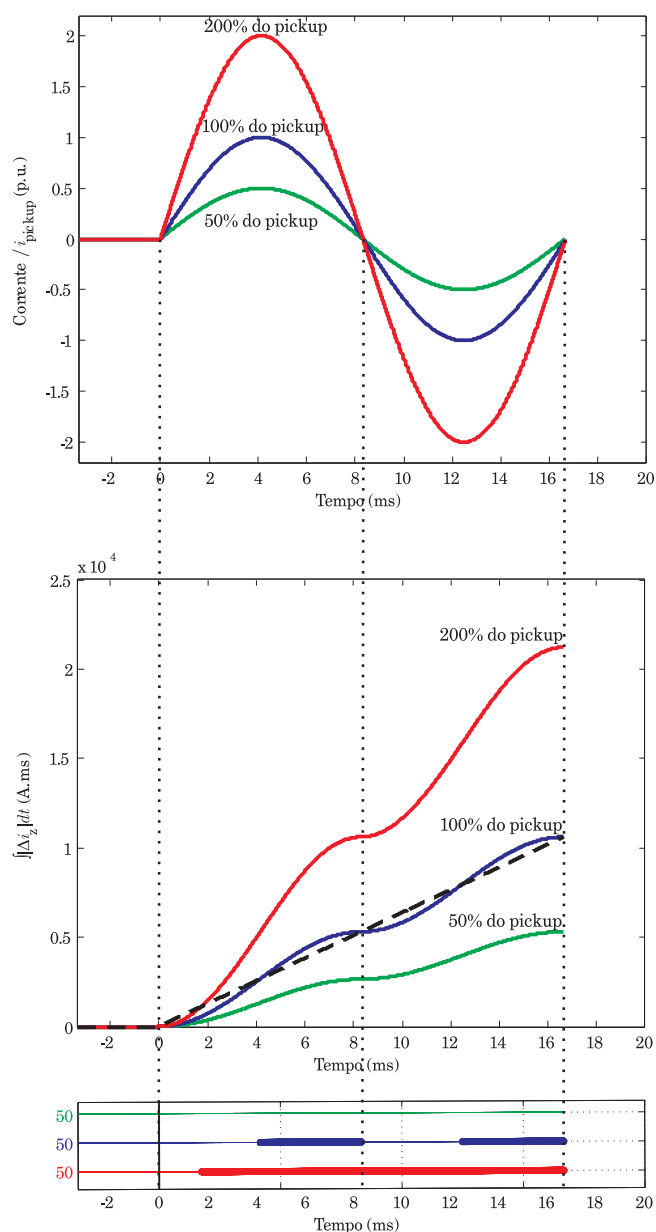


Figura 4.20. Princípio de funcionamento da supervisão por sobrecorrente.

4.3.2 Time-Domain 21 (TD21)

A função de distância (código ANSI 21) para LTs aplicada no domínio do tempo e denominada *Time Domain 21*, ou simplesmente TD21, utiliza de grandezas incrementais para prover tempos de atuação rápidos da ordem de alguns milissegundos.

Sendo a TD21 baseada em um elemento de subalcançe, segundo Schweitzer *et al.* (2015), esta função pode ser aplicada usando relés individuais nos terminais da linha ou por meio do esquema de teleproteção de transferência direta de *trip* por subalcançe, ou seja, *Direct Transfer Trip* (DTT), quando dois relés conectados aos terminais da LT se encontram disponíveis e

comunicando por meio de um canal de comunicação. Portanto, a TD21 emite um *trip* tão logo uma falta seja identificada dentro da zona protegida, a qual tem tamanho menor do que o da LT monitorada, assim como nas funções de distância tradicionais baseadas em fasores.

4.3.2.1 O Princípio de Operação da TD21

A TD21 é um função de distância cujo princípio de operação difere da proteção de distância tradicional. De fato, na proteção 21 tradicional, a localização do ponto de falta é obtida indiretamente por meio da estimação da impedância entre o relé e o curto-circuito. Porém, na TD21, a operação é obtida a partir da comparação entre tensões de operação e restrição criadas para identificar se a falta está dentro ou fora da zona protegida (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Na Figura 4.21, é apresentado um sistema simplificado a partir do qual será exemplificado o princípio de operação da TD21. No circuito puro de falta, é representada a aplicação de um curto-circuito franco em um ponto genérico F da LT, distante m_0 p.u. da barra local do sistema e cuja tensão de pré-falta é v_F (Figura 4.21). Este ponto em m_0 é denominado ponto de alcance da proteção.

De uma forma geral, sabe-se que as LTs dos SEEs são ajustadas para que a queda de tensão ao longo de seus condutores seja pequena, mantendo uma boa regulação de tensão (GLOVER *et al.*, 2011). Assim, a diferença entre as tensões nas barras local e remota se mantém pequena, normalmente entre $\pm 5\%$ da tensão nominal da linha. Por isso, na TD21, considera-se que uma mesma tensão de pré-falta é mantida em todo o comprimento da LT. Para reduzir o impacto dessa aproximação, a tensão de pré-falta no ponto de falta v_F é adotada como sendo a tensão de pré-falta no ponto de alcance da TD21, ou seja, em m_0 , de modo que:

$$v_F = v - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot i_Z , \quad (4.37)$$

em que v e i_Z são a tensão e a corrente no período de pré-falta, respectivamente.

Considerando-se a presença de relés nos terminais da LT, representa-se na Figura 4.21(c), o perfil das tensões incrementais medidas quando da ocorrência de um curto-circuito na linha. A partir de Δv e Δi_Z medidos, o dispositivo de proteção em qualquer uma das barras é capaz de obter com precisão a tensão até o ponto de falta. Nestes casos, as grandezas elétricas medidas pelo relé no terminal de referência são suficientes para estimar o perfil de tensão incremental ao

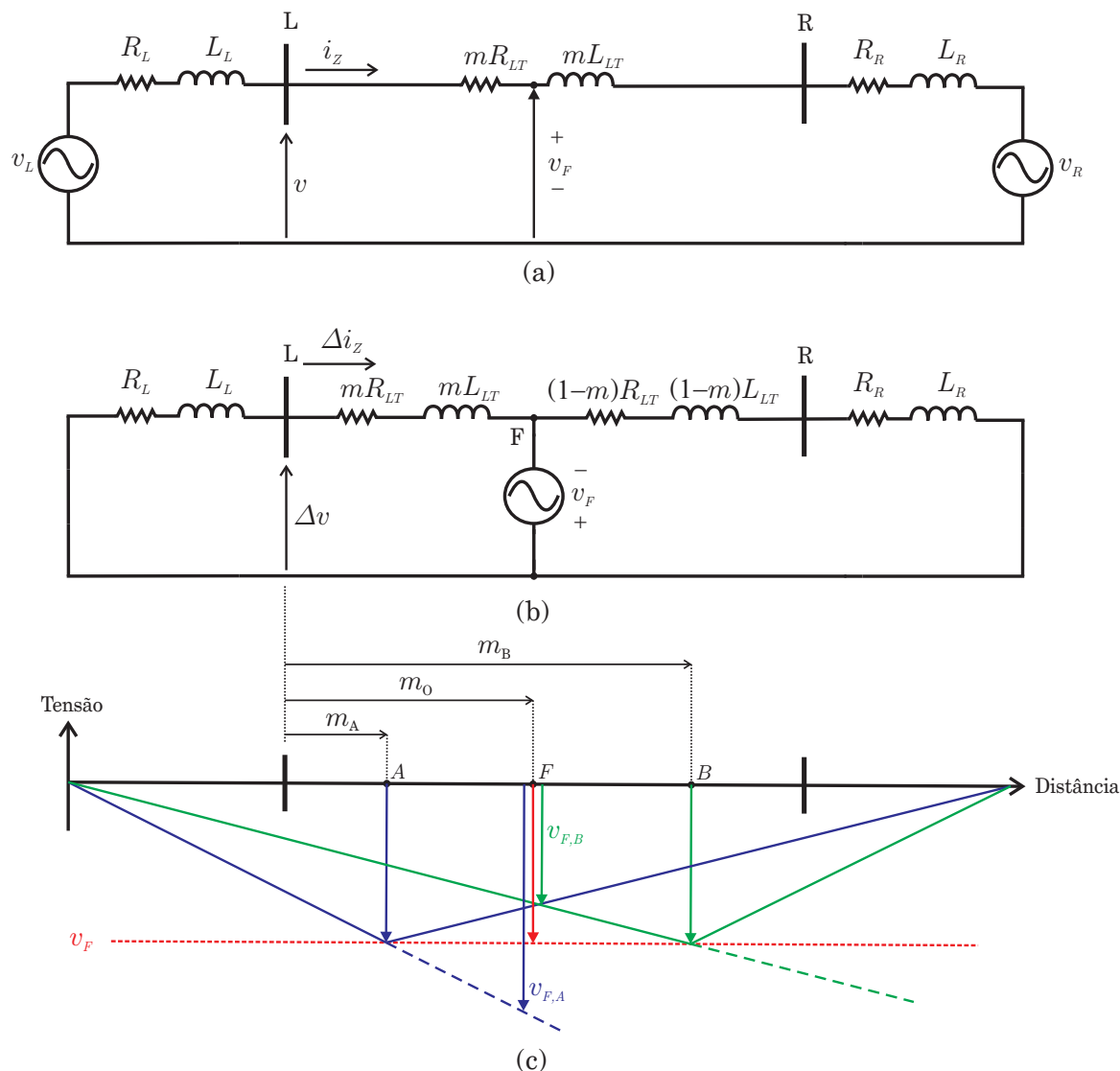


Figura 4.21. Sistema monofásico (a), circuito puro de falta (b) e o perfil de tensão (c) para faltas aplicadas na LT.

longo da LT com boa precisão. Porém, qualquer tentativa de cálculo de tensões além do ponto de falta caracteriza-se como uma extrapolação do perfil enxergado pelo relé, cujo comportamento da curva estimada de tensão seguirá a característica linear observada para a queda de tensão ao longo da LT até o ponto de falta (linhas tracejadas apresentadas na Figura 4.21). De fato, usando os dados de um terminal apenas, não é possível estimar o perfil de tensão incremental além do ponto de falta, visto que nesse caso, medições do terminal oposto seriam necessárias. Assim, a TD21 se baseia na extrapolação do perfil de tensão incremental visto de um único terminal para identificar faltas dentro e fora da zona protegida (SEL, 2016).

Aplicando-se curtos-circuitos em dois pontos diferentes da LT, distantes em m_A e m_B p.u. da barra local do sistema, e assumindo que a máxima variação de tensão possível em qualquer

ponto da LT é própria tensão de pré-falta ao longo da mesma, podem-se obter as tensões de defeito no ponto de alcance da proteção, para ambos os eventos, da seguinte forma:

$$\Delta v_A - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot \Delta i_{Z,A} = -v_{F,A} , \quad (4.38)$$

$$\Delta v_B - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot \Delta i_{Z,B} = -v_{F,B} , \quad (4.39)$$

em que Δv_A , Δv_B , $\Delta i_{Z,A}$, $\Delta i_{Z,B}$ são as tensões e correntes incrementais medidas para os defeitos em m_A e m_B , respectivamente. Além disso, $v_{F,A}$ e $v_{F,B}$ são as tensões falta obtidas no ponto de alcance da proteção, para distúrbios ocorridos em A e B, respectivamente, a partir do perfil de tensão extrapolado, conforme explicado anteriormente.

Analisando-se o perfil de tensão incremental para faltas ao longo da LT (Figura 4.21(c)), percebe-se no caso da falta ocorrida no ponto A, o qual é interno à zona de proteção da TD21, a tensão de falta $v_{F,A}$ é maior em módulo do que a tensão de pré-falta da LT calculada no alcance. Para defeitos após o alcance da zona de proteção, tal como o ocorrido no ponto B, a tensão de pré-falta considerada v_F é maior do que $v_{F,B}$ em módulo, caracterizando uma falta externa à zona protegida. Deve-se notar que, para uma falta no ponto de alcance da zona de proteção, a tensão obtida do perfil de tensão incremental coincidiria com o valor da tensão de pré-falta, o que demonstra existir uma zona de proteção bem definida, que se estende até uma distância m_0 em relação ao terminal de referência.

Considerando o exposto, pode-se definir um algoritmo de distância aplicado no domínio do tempo que determina a presença de um defeito na zona de proteção por meio de comparação entre tensões no ponto de alcance da zona protegida. Assim, do circuito puro de falta, obtém-se um sinal de operação e, do circuito de pré-falta, obtém um sinal de restrição, os quais são chamados de dois sinais V_{21OP} e V_{21R} . Esses sinais são comparados a cada instante de processamento do relé e podem ser calculados usando:

$$V_{21OP} = \Delta v - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot \Delta i_Z , \quad (4.40)$$

$$V_{21R} = v - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot i_Z . \quad (4.41)$$

4.3.2.2 Implementação das Lógicas de Operação e Restrição da TD21

Para prover uma maior segurança da função TD21, o relé SEL-T400L realiza adaptações no sinal de restrição a ser considerado. Para entender esse procedimento e as lógicas de operação da TD21, os principais conceitos relacionados são apresentados nesta seção.

Os sinais de corrente e tensão monitorados que são utilizados nos cálculos de V_{21OP} e de V_{21R} são obtidos no dispositivo de proteção da forma apresentada na Figura 4.22. Inicialmente, a partir das correntes de linha i_ϕ do SEE, são obtidas as seis correntes de loop, conforme apresentado anteriormente na Tabela 4.1. Com o objetivo de controlar a quantidade de transitórios nesses sinais, aplica-se um filtro passa-baixa cuja frequência de corte é da ordem de centenas de hertz. Dessa forma, são obtidas as correntes réplicas de loop utilizadas no cálculo da grandeza de restrição da proteção, as quais garantirão a precisão de alcance desejada para a função TD21 (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Utilizando-se do $BUFFER_1$, para o qual usa-se $p = 1$, ou seja, grandezas incrementais calculadas considerando amostras atrasadas de um ciclo, obtêm-se as correntes réplicas incrementais. Entretanto, por necessidade de precisão na zona de proteção dos elementos de distância, esses sinais ainda são aplicados a um filtro passa-baixa para assim serem obtidas as correntes réplicas incrementais utilizadas no cálculo de V_{21OP} (SCHWEITZER *et al.*, 2015). É empregado o mesmo procedimento para obtenção das tensões incrementais e de pré-falta, que serão utilizadas nos cálculos das grandezas de operação e de restrição da TD21, respectivamente.

Deve-se perceber que, ao utilizar uma variável de restrição baseada apenas nos valores instantâneos atuais dos sinais medidos, pode-se perder em segurança, pois os sinais de restrição e operação são oscilatórios. De fato, existirão regiões dos sinais ao longo do tempo em que a

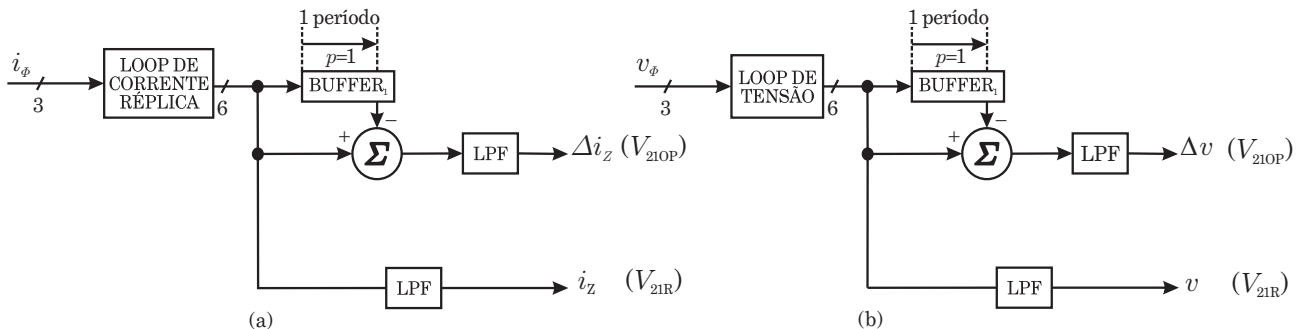


Figura 4.22. Cálculo dos sinais de corrente (a) e tensão (b) utilizados na TD21.

operação pode se tornar maior do que a restrição mesmo para faltas fora da zona protegida, o que poderia causar um *trip* indevido. Para contornar tal problemática e evitar atuações indevidas em casos nos quais tensões de operação e restrição se encontram muito próximas entre si, define-se no T400L uma nova variável de restrição, a qual é denominada V_{21RST} .

Na Figura 4.23(a), é apresentado o diagrama de blocos funcionais empregados no cálculo de V_{21RST} . Nota-se que, ao módulo da tensão de pré-falta calculada no ponto de alcance V_{21R} , por questões de segurança, aplica-se um fator de segurança k , o qual geralmente é um pouco maior do que o valor unitário (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Na sequência, utilizam-se os valores da tensão de pré-falta coletados um ciclo fundamental atrasados. Esta amostra é denominada amostra central. Assim, são também tomadas amostras também atrasadas, porém à frente e

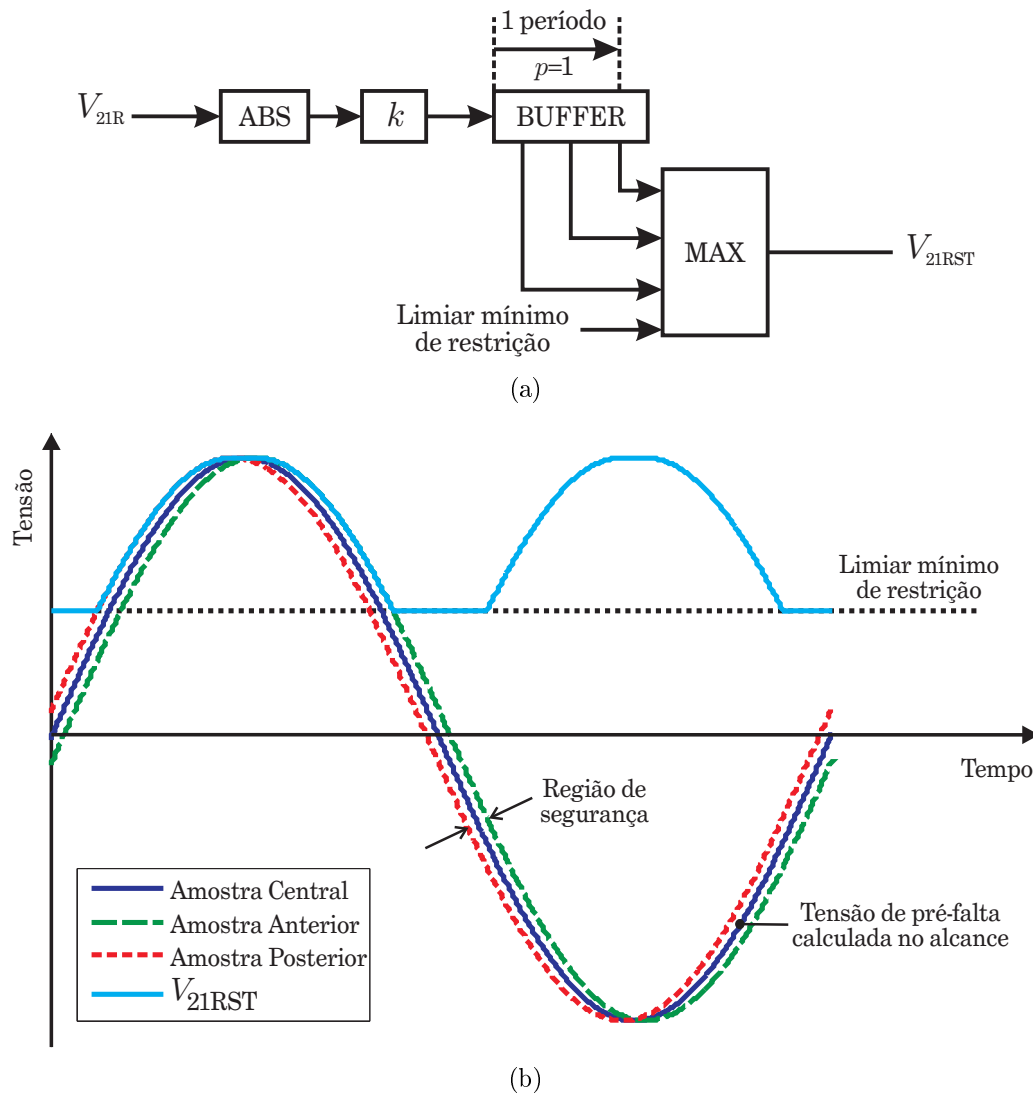


Figura 4.23. Tensão de restrição da TD21: (a) Diagrama de blocos para o cálculo de V_{21RST} ; (b) Exemplo de cálculo de V_{21RST} .

atrás da amostra central. A partir do valor máximo obtido entre essas três amostras e um valor mínimo de restrição, cria-se uma região em torno da tensão V_{21R} , a qual consiste na curva resultante de restrição V_{21RST} , conforme apresentado na Figura 4.23(b). Portanto, obtém-se um elemento de restrição seguro para diferentes condições de falta, em qualquer instante de tempo, sem perda de segurança da função TD21. Neste contexto, deve-se ressaltar que em sistemas de transmissão com compensação série, a lógica de restrição é modificada de acordo com a posição do banco de capacitores no sistema (KASZTENNY *et al.*, 2016). Entretanto, esse tipo de caso não é analisado no presente trabalho e será abordado em estudos futuros.

Em posse das variáveis de operação e restrição, define-se a lógica de operação da TD21, conforme demonstrado na Figura 4.24. Basicamente, quando ativado, o integrador promove a integração da diferença entre o valor absoluto de V_{21OP} e V_{21RST} , resultando na energia E_{21} . Esse integrador é habilitado quando três condições são satisfeitas:

1. O loop de falta em questão deve satisfazer a lógica do *Starting Element* e da seleção de fases descrita na Seção 4.3.1.5;
2. É detectado, no ponto de alcance da proteção, afundamento de tensão.
3. $|V_{21OP}| > V_{21RST}$.

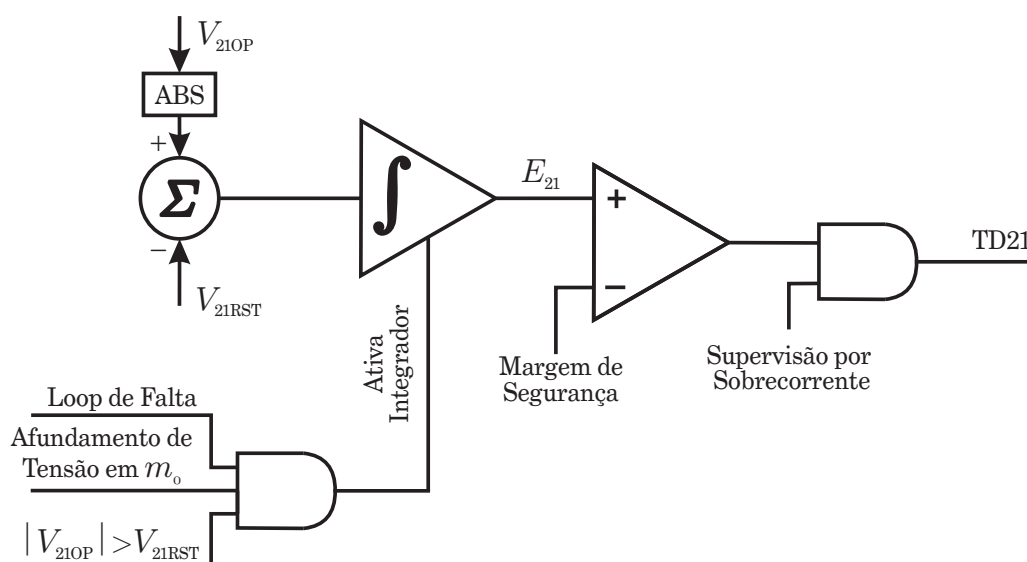


Figura 4.24. Lógica de operação da TD21.

Por fim, a função de distância habilita a *word bit* referente à operação da TD21 quando a energia integrada E_{21} supera um ajuste de limiar de segurança e quando uma sobrecorrente

no sistema monitorado é verificada, conforme explicado na Seção 4.3.1.5. Essas verificações adicionais garantem à função TD21 segurança na operação, uma vez que distingue eventos relativos a chaveamento de bancos de capacitores ou reatores daqueles referentes aos curtos-circuitos. Como segurança adicional, a TD21 tem sua operação bloqueada enquanto a TD32 não detectar a presença de evento direto à LT (KASZTENNY *et al.*, 2016).

4.3.3 *Traveling Wave 32 (TW32)*

A TW32 é uma função direcional de potência (código ANSI 32) que se baseia na teoria das OV's. Essa função é utilizada em conjunto com a TD32 no esquema de teleproteção *POTT*, acelerando a atuação da proteção, quando possível.

4.3.3.1 **Princípio de Funcionamento da TW32**

A TW32, assim como a TD32, utiliza-se da diferença de polaridade entre as tensões e correntes medidas quando da ocorrência de defeitos diretos ou reversos à LT monitorada. Entretanto, na TW32, são as polaridades das OV's que são utilizadas para identificação da direcionalidade do distúrbio. Essas OV's são extraídas dos sinais de corrente e tensão por meio do filtro DS, conforme apresentado na Seção 4.2, sendo, na sequência, comparadas para fins de atuação do T400L.

Quando da ocorrência de defeitos em SEEs, OV's de tensão e corrente são lançadas na rede elétrica. Assim, a compreensão das referências de tensão e corrente no sistema monitorado é importante para o entendimento do princípio de funcionamento da TW32. No sistema apresentado na Figura 4.25, as correntes entrando na LT2 são positivas, devido à polaridade dos TCs. Quanto à tensão, a referência adotada para o sistema é a terra, de modo que as OV's seguem a direção apresentada na Figura 4.25 com uma única polaridade V_+ . Para uma falta interna à LT2, as OV's de tensão e corrente lançadas incidem os terminais da LT com polaridades contrárias. Entretanto, para faltas externas à LT, a polaridade das OV's de tensão e corrente será a mesma em um dos terminais (para o terminal imediatamente a frente do defeito, conforme ilustrado na Figura 4.25(b)). Portanto, pode-se obter uma lógica de operação baseada nas polaridades relativas entre OV's de tensão e corrente, de modo que, segundo o esquema *POTT*, a proteção

atua apenas se ambas as unidades da TW32 nos terminais da linha identificarem curtos diretos, ou seja, OV de tensão e corrente com polaridades contrárias em ambos os terminais (Figura 4.25(a)).

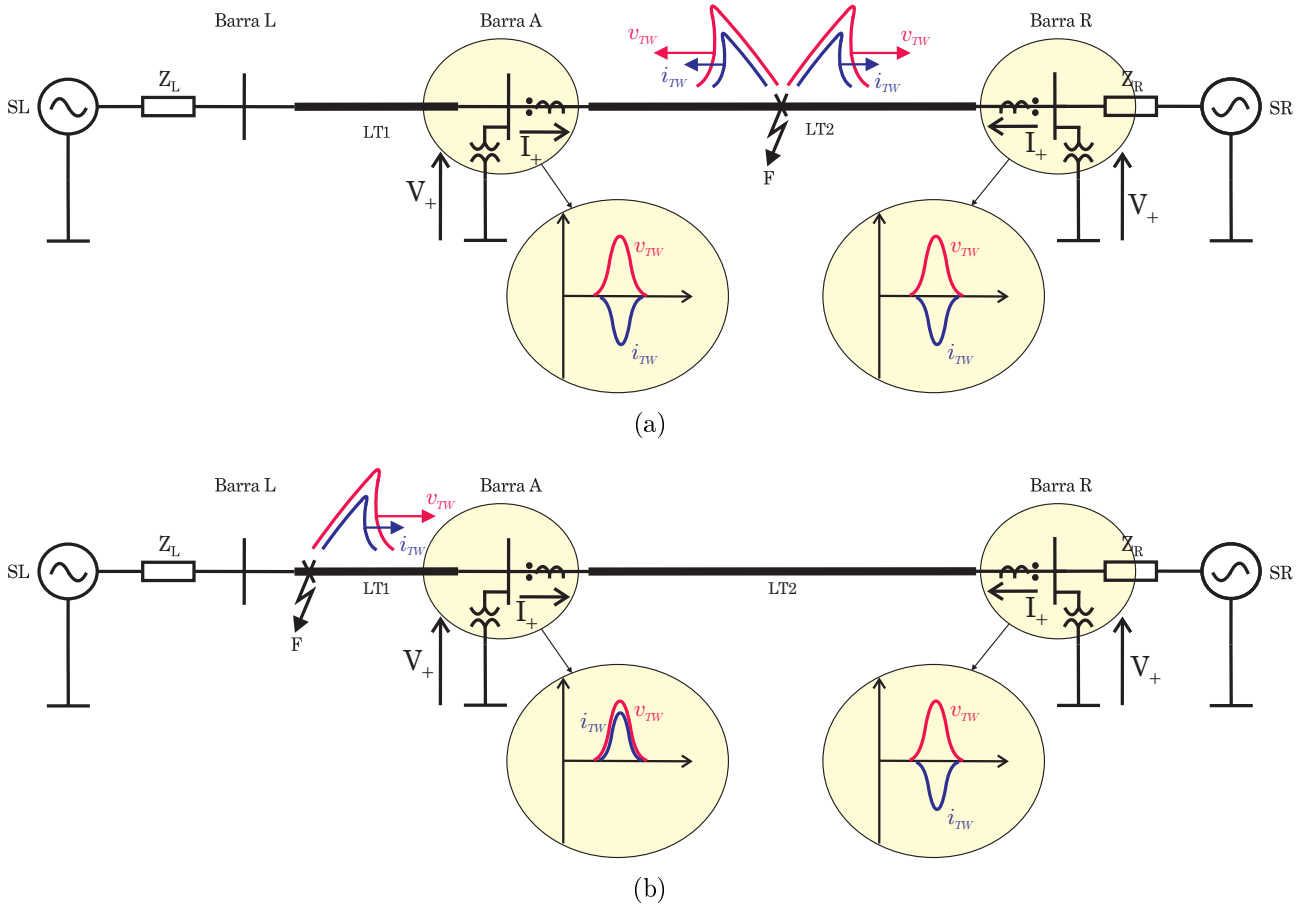


Figura 4.25. Polaridade das ondas viajantes para: (a) Falta Interna à LT e (b) Falta Externa à LT.

Na TW32, define-se o torque de operação T_{32OP} como sendo o produto entre o negativo da OV de tensão e a OV de corrente:

$$T_{32OP} = -v_{TW} \cdot i_{TW} \quad (4.42)$$

em que v_{TW} e i_{TW} são as OVs de tensão e corrente, respectivamente.

Nota-se então que para faltas diretas, T_{32OP} é positivo e, para faltas reversas, negativo. Dessa forma, verifica-se que a partir da polaridade do torque de operação pode-se tomar decisões a respeito da direcionalidade do defeito, a qual, idealmente, poderia ser identificada por meio da simples comparação de T_{32OP} com o valor zero. Entretanto, com intuito de promover uma maior segurança à função TW32, a seguinte condição deve ser satisfeita para que seja declarado

um curto-circuito direto:

$$T_{32OP} > T_{32OP,min} \quad (4.43)$$

em que $T_{32OP,min}$ é um ajuste limiar mínimo do torque de operação.

4.3.3.2 Implementação da Lógica de Operação da TW32

A partir das OV's de tensão e correntes extraídas de cada uma das fases por meio do uso do Filtro DS, define-se a lógica de operação da TW32 no T400L. Esta lógica é apresentada na Figura 4.26 e é executada para cada uma das fases da LT monitorada.

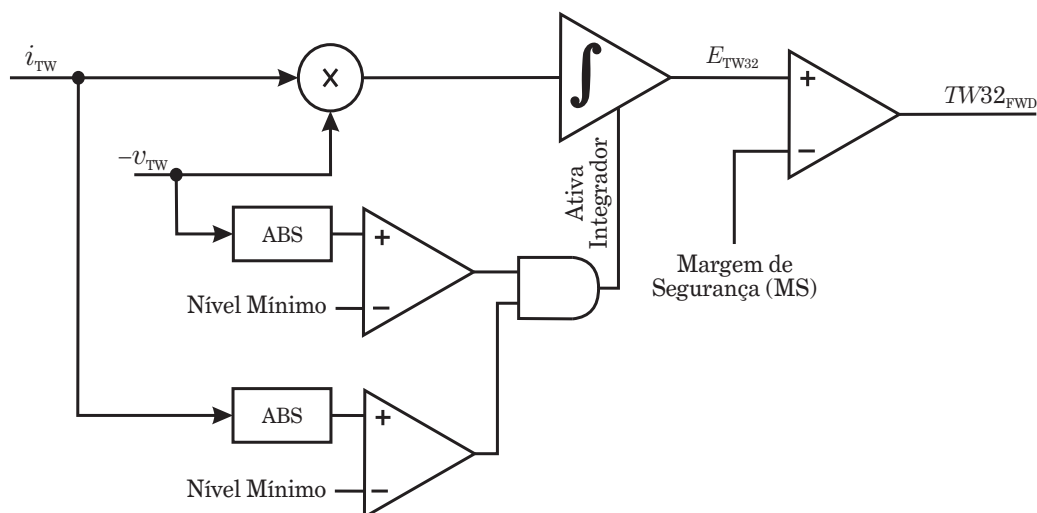


Figura 4.26. Lógica de operação da TW32.

Com intuito de tomar decisões seguras a respeito da direcionalidade da falta, o torque de operação da proteção é integrado. O integrador utilizado mantém as informações referentes ao último instante de integração quando não encontra-se ativo e acumula as informações de sua entrada quando ativo (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Utilizar-se de uma variável integrada, com o integrador seguindo a lógica de integração apresentada, possibilita à TW32 que as decisões tomadas sejam confiáveis, evitando atuações baseadas em variações não relativas à incidência das primeiras OV's nos terminais monitorados. De fato, as primeiras OV's incidentes são suficientes para a detecção da direcionalidade do curto, sendo estas as que apresentam maior influência sobre o comportamento da energia integrada E_{TW32} .

Para que o integrador seja habilitado, deve ser verificado se a amplitude das OV's de tensão e corrente excedem um nível mínimo de amplitude. Embora não mencionado pelo fabricante

do T400L, acredita-se que este limiar é obtido de acordo com a sensibilidade que se deseja alcançar na TW32. Assim, habilitado o integrador, E_{TW32} é comparada com uma margem de segurança MS, a qual é necessária para diferenciar eventos resultantes de chaveamentos na LT dos curtos-circuitos. Ainda, só após um tempo de $T1$ (da ordem de dezenas de microssegundos) do instante de detecção das primeiras OV's de corrente e tensão, identifica-se um curto direto, se e somente se a energia E_{TW32} se mantiver acima da margem de segurança. No instante em que esta energia superar MS durante o período $T1$, a *word-bit* referente à operação da proteção $TW32_{FWD}$ é ativa, caracterizando a ocorrência de um curto direto.

A partir da comunicação entre os relés presentes nos terminais da LT, é tomada a decisão de *trip*. Na Figura 4.27, apresenta-se o esquema POTT do T400L, a partir do qual, percebe-se que a TW32 pode acelerar as decisões de atuação da TD32. De fato, por se basearem na análise de OV's, suas atuações são intrinsecamente mais rápidas e, quando combinadas às atuações da TD32, podem resultar em *trips* mais rápidos do que quando empregada apenas a função TD32.

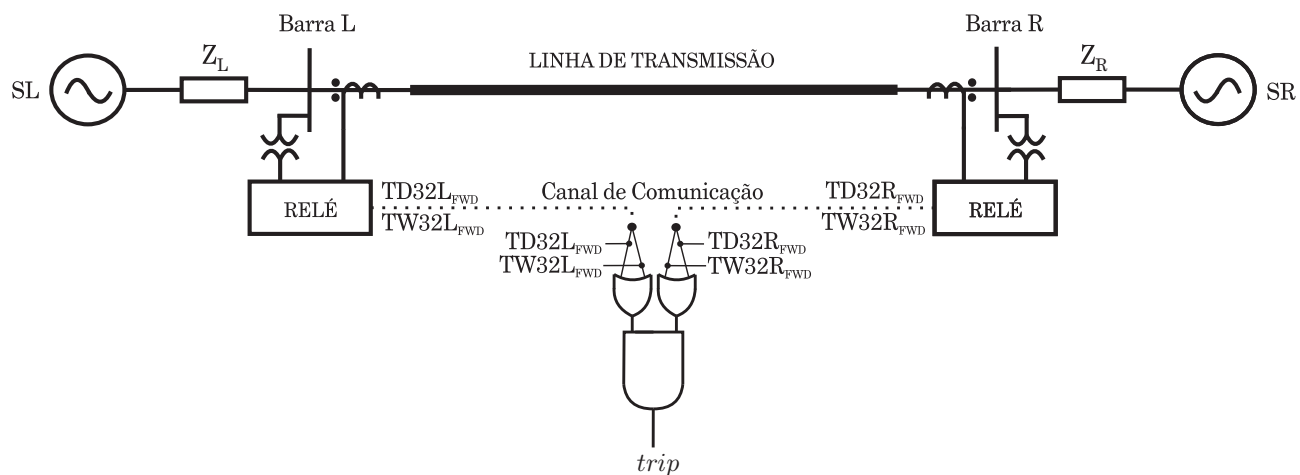


Figura 4.27. Esquema POTT do T400L.

4.3.4 *Traveling Wave 87 (TW87)*

A TW87 é uma função diferencial de linha (código ANSI 87) baseada na teoria das OV's. Essa função avalia OV's de corrente nos terminais da LT, assumindo o sincronismo das medições. Basicamente, as polaridades, magnitudes e tempos de propagação das OV's de corrente são avaliadas nos terminais da LT, viabilizando a distinção entre faltas internas e externas.

4.3.4.1 Princípio de Operação da TW87

A TW87 se baseia na Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC) para tomar decisões de operação e restrição. Assumindo que a LT monitorada é o nó em questão e adotando correntes positivas como sendo aquelas que entram na LT (seguindo polaridades dos TCs), a OV lançada em decorrência de um curto-circuito externo é captada na barra L com polaridade oposta àquela que incide na barra R, conforme apresentado na Figura 4.28. Deve-se notar que em um sistema de transmissão aéreo, os parâmetros das LTs são semelhantes por nível de tensão (GLOVER *et al.*, 2011), de forma que pode-se considerar uma mesma velocidade de propagação nas LTs do sistema, conforme ilustrado para as linhas LT1 e LT2.

Assim sendo, alinhando os instantes de chegada das primeiras OVs de corrente em cada um dos terminais e desconsiderando-se as perdas na linha, pode-se verificar a seguinte relação:

$$i_{TWL} + i_{TWR} = 0 , \quad (4.44)$$

onde i_{TWL} e i_{TWR} são as primeiras ondas de correntes que alcançam os terminais local e remoto da LT, respectivamente.

Da expressão apresentada, percebe-se que a LKC é satisfeita, ou seja, as correntes que entram em um terminal da LT para uma falta externa saem no terminal oposto. Por outro lado, para os curtos-circuitos internos, verifica-se que as OVs de corrente que incidem ambos os terminais da LT apresentam a mesma polaridade, conforme ilustrado na Figura 4.28. Assim sendo, utilizando-se da LKC, observa-se que:

$$i_{TWL} + i_{TWR} \neq 0 . \quad (4.45)$$

Considerando as relações supracitadas, pode-se definir então um elemento diferencial de LTs baseado na análise de amplitudes, polaridade e tempos de propagação de OVs de corrente medidas nos terminais da linha. Para tanto, define-se a variável de operação da proteção i_{DIF} da seguinte forma:

$$i_{DIF}(t) = |i_{TWR}(t) + i_{TWL}(t - P)| , \quad (4.46)$$

em que t é o instante de referência, tomado como o momento de chegada da primeira OV de corrente na barra R e P é a diferença de tempo entre os instantes de chegada entre as primeiras OVs em cada um dos terminais da LT monitorada, conforme apresentado na Figura 4.28.

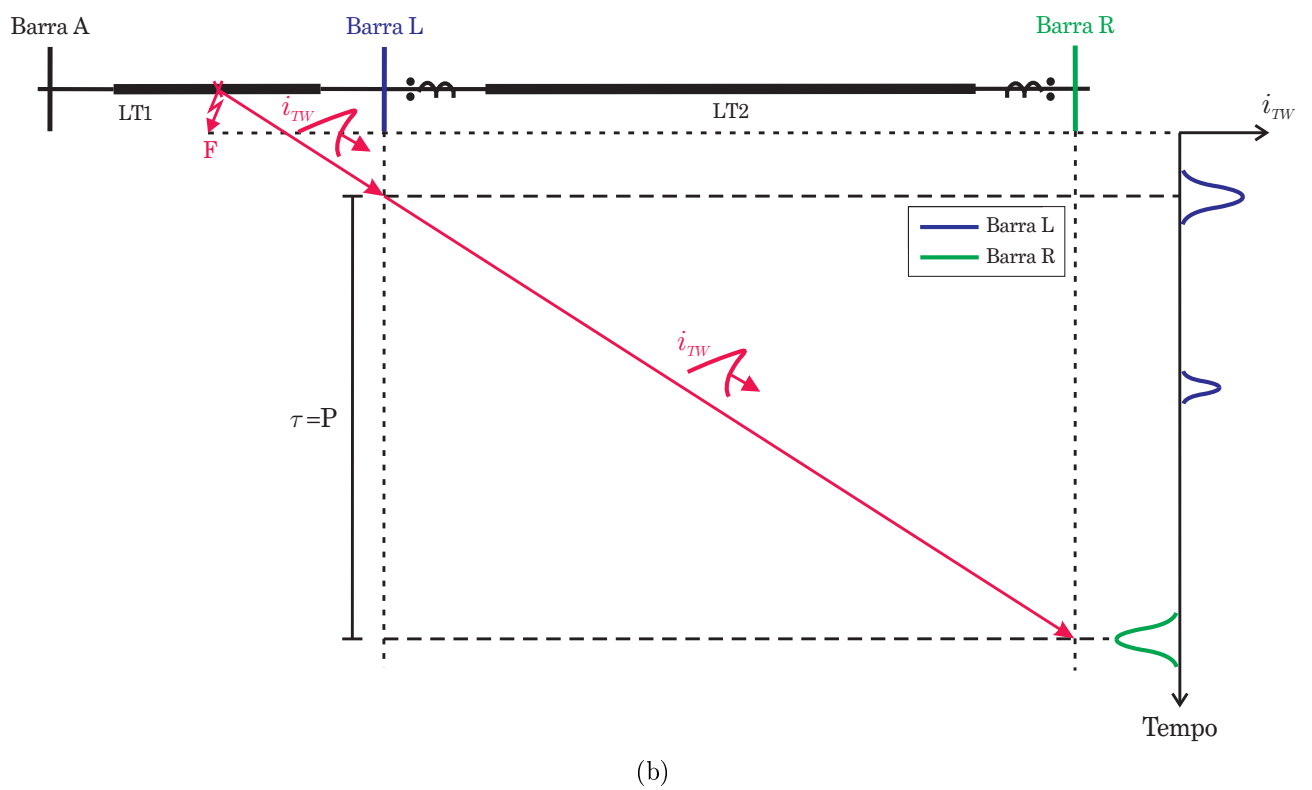
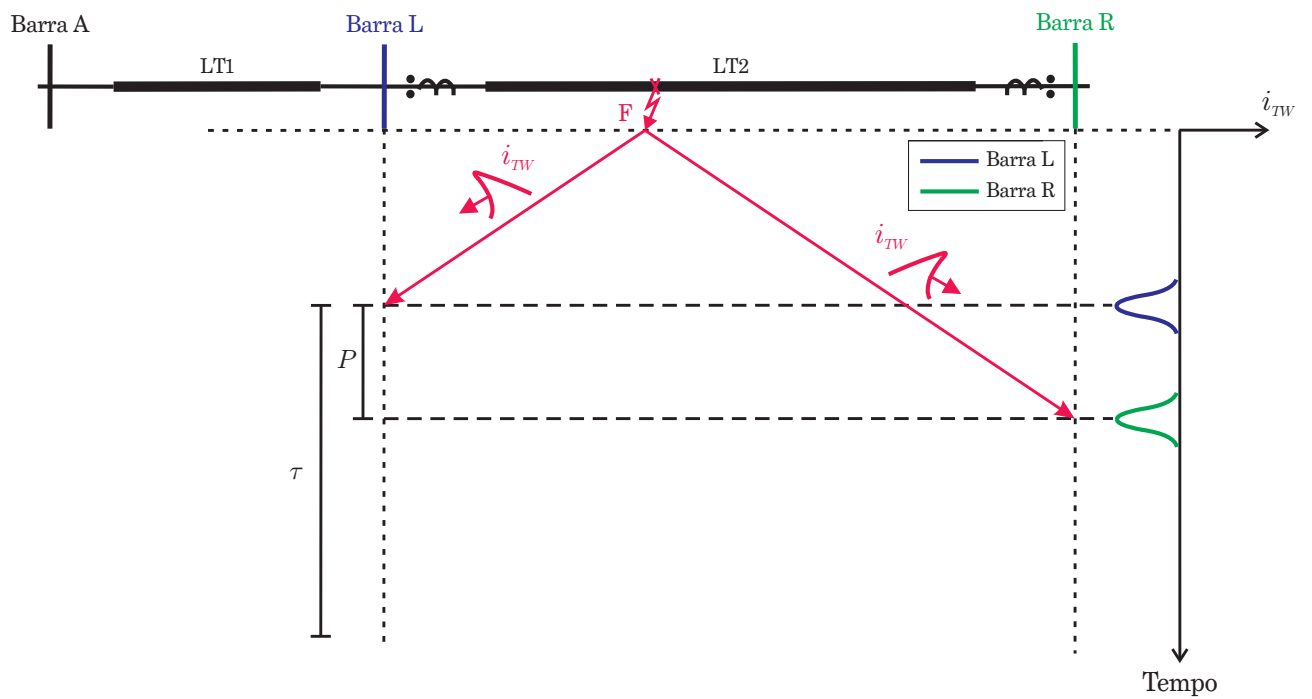


Figura 4.28. Princípio de operação da TW87 para faltas internas (a) e externas (b).

A variável de restrição da TW87, cujo objetivo é restringir a operação da proteção quando da ocorrência de faltas externas ou durante a ausência de defeitos no sistema monitorado, é definida a seguir:

$$i_{RST}(t) = |i_{TWR}(t) - i_{TWL}(t - \tau)|, \quad (4.47)$$

em que τ é o tempo de trânsito da LT monitorada, que consiste no tempo que uma OV precisa para propagar de uma ponta à outra da LT.

Nos defeitos externos, verifica-se que i_{DIF} decresce e i_{RST} se elevada. Ainda considerando casos de curtos-circuitos externos, nota-se que o tempo entre as incidências das primeiras OVs de corrente nos terminais da LT é equivalente a τ , ou seja, $P = \tau$, conforme apresentado na Figura 4.28(b). Porém, para os curtos-circuitos internos, observa-se a elevação de i_{DIF} e a diminuição de i_{RST} . Além disso, nesses casos, a diferença de tempo entre a chegada das primeiras OVs nos terminais da LT P é menor que o tempo de trânsito τ , ou seja, $P < \tau$, conforme demonstrado na Figura 4.28(a). Assim, o elemento diferencial estará habilitado para operar quando for satisfeita a seguinte condição:

$$i_{DIF} > S \cdot i_{RST}, \quad (4.48)$$

sendo S o fator de restrição da função TW87, também conhecido como *slope*, que é utilizado tradicionalmente para conferir segurança à operação de elementos diferenciais.

4.3.4.2 Implementação da Lógica de Operação da TW87

A identificação dos instantes de chegada de cada uma das OVs de corrente nos terminais da LT é a primeira etapa de implementação da TW87. Primeiramente, é identificado o instante de chegada das primeiras OVs de corrente incidentes em cada um dos terminais da LT, os quais são adaptados para serem representados em número de amostras resultando nas estimativas NL_{PRI} e NR_{PRI} para os terminais local e remoto, respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.29.

Em posse dos índices NL_{PRI} e NR_{PRI} , são estabelecidas janela de busca nos terminais opostos aos de referência, as quais são centradas em um instante τ segundos após a detecção das primeiras OVs incidentes no terminal de referência. O objetivo é determinar o índice da amostra referente ao instante de saída da OV no terminal oposto, resultando nas estimativas

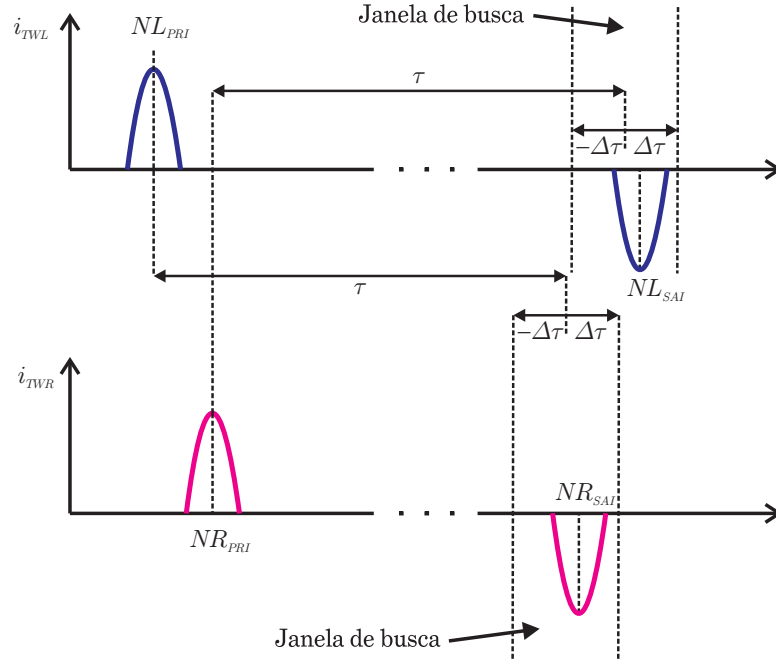


Figura 4.29. Definindo os instantes de entrada e saída das OV's de corrente na LT monitorada.

NL_{SAI} e NR_{SAI} . À janela de busca estabelecida, é adicionada uma margem $\Delta\tau$, a qual é necessária para abranger possíveis erros no tempo de propagação ajustado na função TW87, que pode ser proveniente de incertezas nos parâmetros elétricos e físicos da LT monitorada.

Após identificar os instantes de entrada e saída das OV's em cada um dos terminais da LT, calculam-se os sinais que possibilitarão a operação da proteção diferencial: IL , IR , I_{DIF} , I_{RST} e m_{87} (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

IL e IR referem-se às magnitudes das primeiras OV's detectadas nos terminais da LT e são utilizadas para garantir que a proteção somente operará quando da ocorrência de transitórios com energia relevante, evitando atuações em decorrência da incidência de OV's de origem duvidosa. Essas variáveis são definidas da seguinte forma:

$$IL = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL}(NL_{PRI} - k) \right|, \quad (4.49)$$

$$IR = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR}(NR_{PRI} - k) \right|, \quad (4.50)$$

em que M é igual a metade do número de amostras contidas na janela de dados do filtro DS e $C = \frac{2}{N_{DS}}$ para que o ganho do somatório seja unitário, mantendo a informação de amplitude das OV's detectadas, sendo N_{DS} o número de coeficientes do filtro DS.

A grandeza de operação da TW87 I_{DIF} é obtida da seguinte forma:

$$I_{DIF} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL}(NL_{PRI} - k) + i_{TWR}(NR_{PRI} - k) \right|, \quad (4.51)$$

em que M e C são definidos da mesma forma como no cálculo de IR e IL apresentado anteriormente.

Quanto à variável de restrição I_{RST} , caso a primeira OV de corrente incidente seja referente ao terminal local, ou seja, $NL_{PRI} < NR_{PRI}$, pode-se calcular:

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL}(NL_{PRI} - k) - i_{TWR}(NR_{SAI} - k) \right|, \quad (4.52)$$

caso contrário,

$$I_{RST} = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR}(NR_{PRI} - k) - i_{TWL}(NL_{SAI} - k) \right|. \quad (4.53)$$

Por último, utiliza-se de uma variável auxiliar de localização de faltas normalizada m_{87} obtida do algoritmo clássico de dois terminais para determinar se o defeito encontra-se na LT monitorada. m_{87} é calculada usando:

$$m_{87} = 0,5 \cdot \left(1 + \frac{NL_{PRI} + NR_{PRI}}{\tau_{amostras}} \right), \quad (4.54)$$

onde $\tau_{amostras}$ refere-se ao número de amostras equivalentes ao tempo de propagação da linha τ .

Assim, a partir do uso de todas as variáveis apresentadas, define-se a lógica de operação da TW87 conforme apresentado na Figura 4.30. Esta lógica é executada para cada uma das fases do sistema monitorado em separado. A habilitação da *word bit* referente a operação da proteção diferencial TW87, se dá perante a observação de algumas condições no sistema de transmissão inspecionado, a saber:

- Por meio de IL e IR , é observado se há energia suficiente proveniente das primeiras OVs de corrente que incidem nos terminais da LT. Para tanto, comparam-se essas variáveis com um nível mínimo de pickup P , ao qual é aplicado ainda a um fator de ajuste de sensibilidade K para detecção das OVs. Esta condição permite diferenciar eventos que resultam em transitórios de baixa energia daqueles de elevada energia, tais como curtos-circuitos;

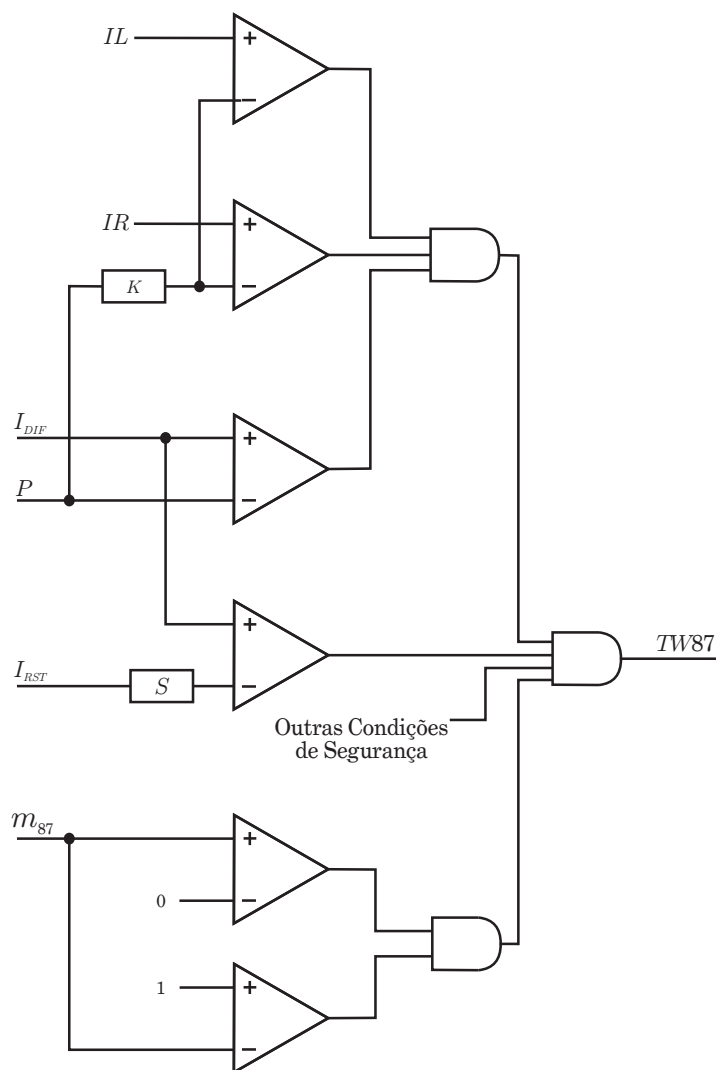


Figura 4.30. Lógica de operação da TW87.

- A partir da comparação da variável de operação I_{DIF} com o ajuste de limiar mínimo P , é verificado se o evento detectado apresenta um nível mínimo de operação desejado, garantindo segurança ao elemento diferencial;
- Comparando-se I_{DIF} com I_{RST} multiplicada pelo fator de restrição da proteção diferencial S , pode-se determinar se a condição para operação da proteção é alcançada, ou seja, se o curto-circuito é interno ou externo;
- Ao avaliar a variável m_{87} , tem-se uma resposta normalizada sobre a localização do defeito. Assim, ao obter m_{87} entre 0 e 1, considera-se que a falta de fato ocorreu internamente à LT monitorada, caso contrário, a TW87 é bloqueada. Procedendo desta forma, evita-se a atuação para casos de transitórios de origem externa à LT, que possam satisfazer as condições anteriores para determinados ajustes;

- Por último, condições adicionais de segurança são empregadas para diferenciar eventos referentes a chaveamento na LT daqueles relacionados aos curtos-circuito, destacando-se, dentre as existentes, uma supervisão por sobrecorrente.

A supervisão por sobrecorrente da TW87 é implementada conforme descrito na Seção 4.3.1.5 e é responsável por diferenciar os eventos que resultam em correntes de fato perigosas para a rede elétrica. Assim, torna-se possível diferenciar curtos-circuitos de procedimentos de chaveamento na LT, por exemplo. Adicionalmente, embora neste trabalho não sejam analisados casos de linhas com compensação capacitiva série, é importante ressaltar que em topologias desse tipo a TD32 supervisiona a TW87 (KASZTENNY *et al.*, 2016).

4.3.4.3 Seleção de Fases na TW87

Com intuito de prover *trip* segregado por fases à TW87, utiliza-se de um método de seleção de fases cujo funcionamento se baseia na análise da soma das primeiras OV's de corrente incidentes nos terminais monitorados. Trata-se de uma soma realizada por fase das OV's verificadas nos instantes NL_{PRI} e NR_{PRI} nos terminais local e remoto, respectivamente, definida da seguinte forma:

$$i_{FASE} = i_{TWL}(NL_{PRI}) + i_{TWR}(NR_{PRI}) . \quad (4.55)$$

Conforme reportado em SEL (2016), os padrões de i_{FASE} para cada tipo de curto-circuito possibilitam a identificação da fase sob falta e, conseqüentemente, a abertura monopolar ou tripolar dos disjuntores da LT monitorada.

Na Figura 4.31, apresentam-se os padrões das OV's obtidos para faltas monofásicas e bifásicas. Observa-se que há uma diferença de magnitude e polaridade entre as fases com falta e as fases sadias, que não estão envolvidas no distúrbio. Assim, uma precisa e rápida seleção de fases é obtida, viabilizando atuações segregadas por fase da TW87. Deve-se notar que o atraso no processo de seleção de fases é o mesmo requerido pela TW87 para atuar, ou seja, no caso mais lento, o tempo de trânsito da LT. Por isso, não são verificados atrasos adicionais na atuação da TW87, garantindo a velocidade esperada para esta função.

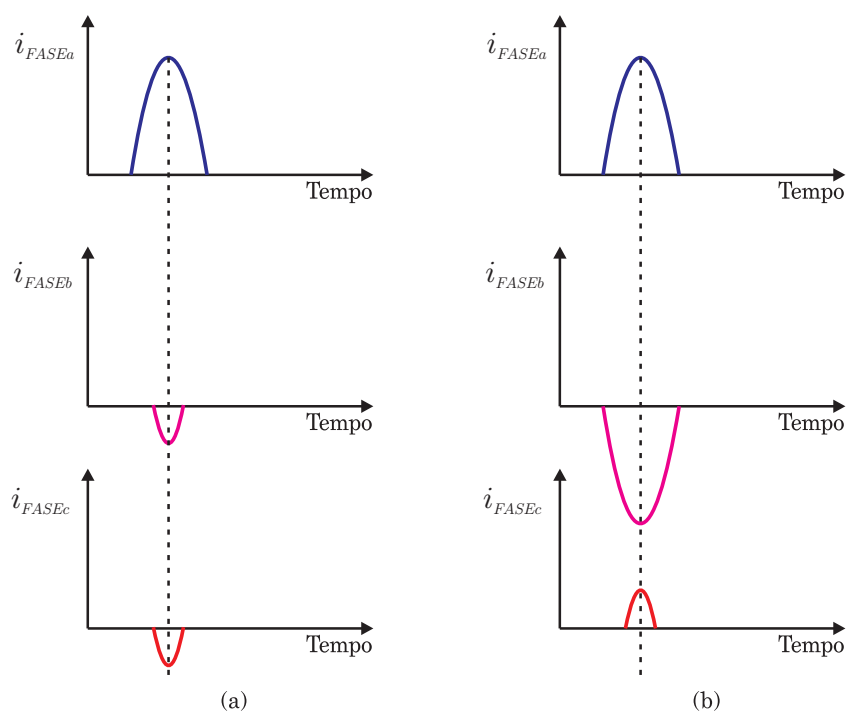


Figura 4.31. Padrão de magnitude e polaridade de i_{FASE} para uma falta monofásica AT (a) e para uma bifásica do tipo AB (b).

4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO E RESUMO DOS AJUSTES DO RELÉ SEL-T400L

Neste capítulo, foram apresentados os princípios de operação e implementação das funções de proteção no domínio do tempo disponíveis no relé SEL-T400L. Das seções apresentadas, nota-se que são inúmeros os ajustes necessários, os quais podem ser classificados em dois diferentes grupos: 1) Ajustes pré-definidos, os quais são determinados em fábrica e que o usuário não tem a possibilidade de alterá-los; e 2) Ajustes programáveis pelo usuário, os quais dependem da basicamente da topologia do sistema de transmissão a ser protegido.

Os ajustes de todas as funções no domínio do tempo apresentadas nas seções anteriores deste capítulo são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Os ajustes pré-definidos em fábrica são encontrados na Tabela 4.2 e os ajustes programáveis, definidos como ajustes de campo, são listados na Tabela 4.3.

No próximo capítulo, serão apresentados detalhes sobre procedimentos para ajuste do relé SEL-T400L, bem como resultados de testes realizados por meio de simulações computacionais.

Tabela 4.2. Ajustes definidos em fábrica.

Elemento	Ajuste	Descrição	Aplicação
TW32	i_{TW32_MIN}	Nível mínimo de corrente	Nível mínimo de corrente necessário para ativar o integrador da TW32.
	v_{TW32_MIN}	Nível mínimo de tensão	Nível mínimo de tensão necessário para ativar o integrador da TW32.
	MS_{TW32}	Margem de segurança	Margem utilizada para que, a partir da comparação com o torque de operação integrado, a função identifique a presença de distúrbio na LT.
	T1	Tempo de verificação do torque de operação	Período de tempo após o qual verificasse a saída do torque integrado para habilitar a <i>word-bit</i> de operação da proteção.
TD32	MS_{TD32}	Margem de segurança	Ajuste necessário para que a TD32 indique com segurança a direcionalidade do distúrbio nos instantes em que as grandezas incrementais de tensão e de corrente do sistema cruzam o zero.
	T2	Tempo de reforço inicial	Período de tempo durante o qual aplica-se um reforço nos torques de operação e restrição da função durante os primeiros instantes do distúrbio.
TD21	V_{MIN}	Limiar mínimo de restrição	Ajuste utilizado para determinar a curva de restrição da TD21.
	MS_{TD21}	Margem de segurança	Ajuste utilizado para garantir segurança às indicações da TD21.
TW87	P	Nível mínimo de pickup	Define se as OV's lançadas pelo distúrbio alcançam os terminais da linha com um nível mínimo de magnitude necessário para atuação da proteção.
	K	Fator de segurança	Coefficiente de segurança aplicado à P.
	S	Slope (ou fator de restrição)	Elemento de restrição da função diferencial.
	$\Delta\tau$	Variação do tempo de propagação da LT	Garante à TW87 segurança perante casos de variação do tempo de propagação da linha.

Tabela 4.3. Ajustes de campo do relé no domínio do tempo (KASZTENNY *et al.*, 2016).

Elemento	Ajuste	Descrição	Aplicação
TD32	TD32ZF	Impedância de ajuste para defeitos diretos	Ajustes utilizados nos limiares adaptativos da TD32 e que são responsáveis por proverem segurança e rapidez à proteção.
	TD32ZR	Impedância de ajuste para defeitos reversos	
TD21	TD21MP	Alcance para os loops de falta bifásicos	Alcances que definem a zona de proteção da TD21 para loops de falta monofásicos e bifásicos.
	TD21MG	Alcance para os loops de falta monofásicos	
TW87	TWLPT	Tempo de propagação da linha	Ajuste utilizado para definir a variável de restrição da TW87.
	TP50P	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta bifásicos	Ajustes utilizados para diferenciar eventos de baixa energia daqueles de elevada energia, tais como os associados aos curtos-circuitos.
	TP50G	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta monofásicos	
POTT e TD21	TP67P	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta bifásicos	Supervisão por sobrecorrente para determinar se o evento identificado é um curto-circuito. Definem a sensibilidade da proteção.
	TP67G	Supervisão por sobrecorrente para os loops de falta monofásicos	
Geral	XC	Reatância do banco de capacitores interno à LT	Utilizados para ajustarem as lógicas das funções quando da presença de banco de capacitores na LT.
	EXTSC	Presença ou ausência de banco de capacitores externo à LT	

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ SEL-T400L

Neste capítulo serão apresentados estudos, simulações computacionais e os resultados testes que ilustram os procedimentos de parametrização dos ajustes de campo do relé SEL-T400L. Ademais, também são apresentados detalhes do sistema teste considerado, o qual será objeto de estudo durante a avaliação das funções implementadas.

5.1 SISTEMA TESTE SIMULADO

Toda e qualquer função de proteção deve ser corretamente parametrizada para que o seu funcionamento ocorra dentro do esperado. Ainda, diante fato de algumas das funções do T400L consistirem em uma novidade no estado da arte e no setor elétrico, faz-se necessário apresentar procedimentos que possibilitem o correto ajuste de seus algoritmos.

Com o intuito de alcançar a parametrização dos ajustes de campo do T400L (ver Tabela 4.3), utiliza-se o sistema elétrico teste apresentado na Figura 5.1, cujos parâmetros são apresentados na própria figura, usando os subscritos '1' e '0' para representar dados de sequência positiva e zero, respectivamente.

O sistema teste utilizado tem tensão nominal de 500 kV/60 Hz e foi modelado e simulado no ATP. Basicamente, são consideradas três LTs e dois sistemas equivalentes que a circundam as linhas, simulando as redes elétricas em torno do sistema monitorado. As LTs foram modeladas como perfeitamente transpostas a parâmetros distribuídos constantes na frequência (CENTER, 1992). Considera-se também que a LT monitorada tem extensão de 200 km e as linhas adjacentes extensão de 100 km. As fontes dos equivalentes de Thévenin são modeladas como ideais, cujos ajustes se resumem ao módulo e fase da tensão terminal. Por outro lado, as impedâncias de Thévenin são definidas em termos do SIR do sistema, ou seja, como o produto

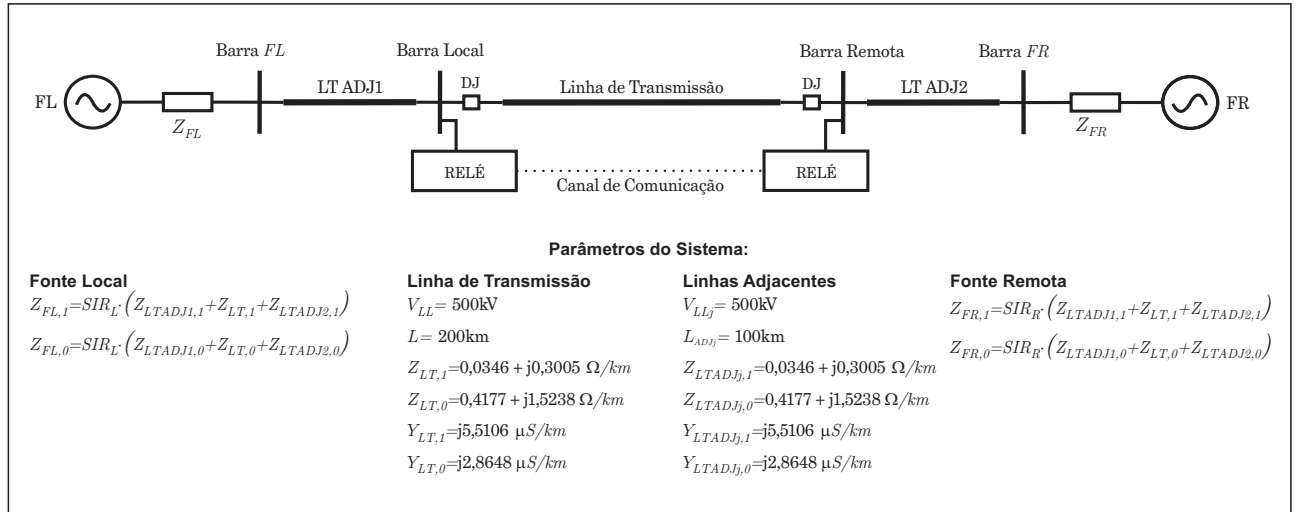


Figura 5.1. Sistema elétrico de potência utilizado para testes e parametrização das funções de proteção no domínio do tempo.

do SIR considerado e o total da impedância séria da LT principal e das LTs adjacentes. Para cada lado do sistema foi definido um SIR específico, resultando nos valores SIR_L e SIR_R para os terminais local e remoto, respectivamente.

Visando verificar unicamente o funcionamento dos algoritmos de proteção, ou seja, sem a influência de transformadores para instrumento, todos os resultados apresentados neste capítulo serão relacionados aos sinais primários do sistema analisado. Essa decisão é tomada com o objetivo de não incluir as variações elétricas impostas pelos transformadores para instrumentos nos sinais medidos, conforme apresentado em Lopes *et al.* (2016b). Ressalta-se ainda que o sistema simulado não apresenta nenhum tipo de compensação (série ou shunt).

Conforme mencionado em capítulos anteriores, o relé SEL-T400L faz uso de uma frequência de amostragem de 1 MHz (SCHWEITZER *et al.*, 2015), resultando em um período de amostragem de $1\mu\text{s}$. Porém, embora possível, a representação dessa taxa de amostragem no ATP requereria o uso de passos de integração muito pequenos, o que tornaria as simulações demasiadamente lentas, dificultando a dinâmica das análises ao longo desta pesquisa. Por isso, por questões de simplificação e para redução do tempo de simulação dos casos, considerou-se neste trabalho um passo de integração no ATP de $5\mu\text{s}$, resultando em sinais com 3333 amostras por ciclo, o qual se mostra suficiente para reproduzir com boa precisão os fenômenos transitórios avaliados nesta pesquisa. Para representar a máxima frequência de amostragem possível, não foram realizados procedimentos de subamostragem dos sinais provenientes do ATP, resultando

em uma frequência de amostragem simulada de 200 kHz. Cabe ressaltar que nenhum filtro adicional foi implementado no ATP e os demais procedimentos relacionados ao processamento dos sinais monitorados seguiram a implementação conforme descrito na Seção 4.1, especificamente na Figura 4.1.

5.2 AJUSTES DO RELÉ SEL-T400L

Conforme apresentado na Seção 4.4, inúmeros são os ajustes de campo das funções no domínio do tempo avaliadas. Inicialmente, serão apresentados os ajustes de sobrecorrente e, em sequência, os demais ajustes para cada uma das funções avaliadas neste trabalho. Para o ajuste de sobrecorrente, será apresentado o passo-a-passo do procedimento de cálculo somente para as variáveis de sobrecorrente do esquema *POTT* — *TP67G* e *TP67P*. Isto porque, para sistemas de transmissão sem qualquer tipo de compensação reativa, os ajustes de sobrecorrente das funções avaliadas são idênticos e escolhidos de forma a sensibilizá-las.

5.2.1 Ajustes da Supervisão por Sobrecorrente

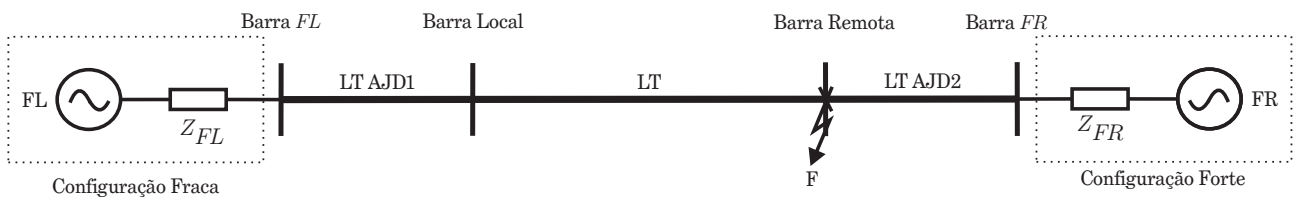
Os ajustes da supervisão por sobrecorrente *TP67G* e *TP67P*, quando da ausência de qualquer tipo de compensação reativa ao longo LT, são selecionados de forma a proverem ao algoritmo a sensibilidade desejada. Para parametrização desses ajustes, recomenda-se o cálculo das correntes réplica de loop no domínio da frequência, utilizando-se de fasores incrementais. Essa recomendação visa a redução dos esforços matemáticos associados ao procedimento, os quais são árduos quando realizados no domínio do tempo. Assim sendo, visando facilitar o andamento do texto, apresenta-se novamente na Tabela 5.1 os sinais de tensão e corrente incrementais para os loops de falta, porém, no domínio da frequência. Os parâmetros $Z_{LT,1}$ e $Z_{LT,0}$ encontrados nesta tabela se referem às impedâncias de sequência positiva e zero da LT, respectivamente.

Com intuito de sensibilizar ao máximo a TD32, deve-se considerar o sistema na seguinte topologia (KASZTENNY *et al.*, 2016): o equivalente local configurado para uma situação de fonte fraca e o equivalente remoto configurado para uma situação de fonte forte. Assumindo que o relé se encontra no terminal local, usando este cenário, aplica-se um curto-circuito no termi-

Tabela 5.1. Loop de tensões e correntes incrementais no domínio da frequência

Loop	Tensão $\Delta\hat{V}$	Corrente Réplica $\Delta\hat{I}_Z$
AT	$\Delta\hat{V}_A$	$\Delta\hat{I}_A \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{ Z_{LT,0} }{ Z_{LT,1} } \angle Z_{LT,0} \right)$
BT	$\Delta\hat{V}_B$	$\Delta\hat{I}_B \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{ Z_{LT,0} }{ Z_{LT,1} } \angle Z_{LT,0} \right)$
CT	$\Delta\hat{V}_C$	$\Delta\hat{I}_C \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_0 \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{ Z_{LT,0} }{ Z_{LT,1} } \angle Z_{LT,0} \right)$
AB	$\Delta\hat{V}_A - \Delta\hat{V}_B$	$\Delta\hat{I}_A \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_B \angle Z_{LT,1}$
BC	$\Delta\hat{V}_B - \Delta\hat{V}_C$	$\Delta\hat{I}_B \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_C \angle Z_{LT,1}$
CA	$\Delta\hat{V}_C - \Delta\hat{V}_A$	$\Delta\hat{I}_C \angle Z_{LT,1} - \Delta\hat{I}_A \angle Z_{LT,1}$

nal remoto, cuja impedância de falta deve estar em conformidade com a sensibilidade almejada (KASZTENNY *et al.*, 2016), conforme apresentado na Figura 5.2. Assim, para configurar o ajuste *TP67P*, a falta a ser aplicada deve ser bifásica e para o ajuste *TP67G*, monofásica (KASZTENNY *et al.*, 2016). Como resultado, obtém-se a menor corrente possível a ser disponibilizada ao dispositivo de proteção localizado no terminal local para os diferentes tipos de falta, viabilizando uma correta supervisão por sobrecorrente. O mesmo procedimento é adotado na parametrização do dispositivo localizado no terminal remoto da LT, mudando-se apenas o terminal de referência para a análise.

**Figura 5.2.** Aplicação de curto-circuito para determinação dos ajustes de sobrecorrente da TD32 para o relé do terminal local.

De acordo com IEEE Power System Relaying Committee (2000), a faixa de valores de SIR pode ser classificada de acordo com o comprimento da LT do SEE monitorado, de forma que se tem tipicamente:

- Linha longa — $SIR < 0,5$
- Linha média — $0,5 < SIR < 4$

- Linha curta — $SIR > 4$

Avaliando o sistema teste, nota-se que a LT protegida tem 200 km, podendo ser classificada como uma LT média (GLOVER *et al.*, 2011). Assim, utilizando-se os valores de SIR apresentados pelo IEEE Power System Relaying Committee (2000), considera-se $SIR_L = 4$ e $SIR_R = 0,5$, simulando fontes trifásicas fracas e fortes nos terminais local e remoto, respectivamente, conforme especificado por Kasztenny *et al.* (2016).

Na análise de curto-circuito, para obtenção dos fasores de corrente réplica incremental e, conseqüentemente, dos ajustes de sobrecorrente, o fabricante do T400L propõe o uso de softwares de proteção de SEEs (KASZTENNY *et al.*, 2016), de forma a facilitar os estudos elétricos. Entretanto, neste trabalho, as correntes de falta serão obtidas a partir da análise clássica de curto-circuito, desprezando-se a corrente de carga do sistema. A escolha por esta forma de apresentação do procedimento tem o intuito de detalhar os passos do processo de parametrização dos ajustes de sobrecorrente.

O referido procedimento inicia-se com análise de curto-circuito monofásico no terminal remoto da LT, estando o sistema na topologia descrita anteriormente. As componentes de sequência para uma falta AT franca ($R_F = 0$) no terminal remoto da LT encontram-se na Figura 5.3(a), sendo:

$$Z_1 = (Z_{FR,1} + Z_{LTADJ2,1}) // (Z_{LTADJ1,1} + Z_{LT,1} + Z_{FL,1}) , \quad (5.1)$$

$$Z_2 = (Z_{FR,2} + Z_{LTADJ2,2}) // (Z_{LTADJ1,2} + Z_{LT,2} + Z_{FL,2}) , \quad (5.2)$$

$$Z_0 = (Z_{FR,0} + Z_{LTADJ2,0}) // (Z_{LTADJ1,0} + Z_{LT,0} + Z_{FL,0}) . \quad (5.3)$$

Dessa forma, no ponto de aplicação da falta simulada, considerando as configurações do sistema teste já descritas, obtêm-se:

$$Z_1 = Z_2 = 78,3712 \angle 83,4318^\circ \Omega , \quad (5.4)$$

$$Z_0 = 409,3669 \angle 74,6708^\circ \Omega . \quad (5.5)$$

Uma vez que no método clássico de análise de curto-circuito não são consideradas as contribuições de carga do sistema, as correntes de sequência resultantes representam o incremento de corrente ocasionado pelo defeito, ou seja, os valores incrementais provenientes do circuito

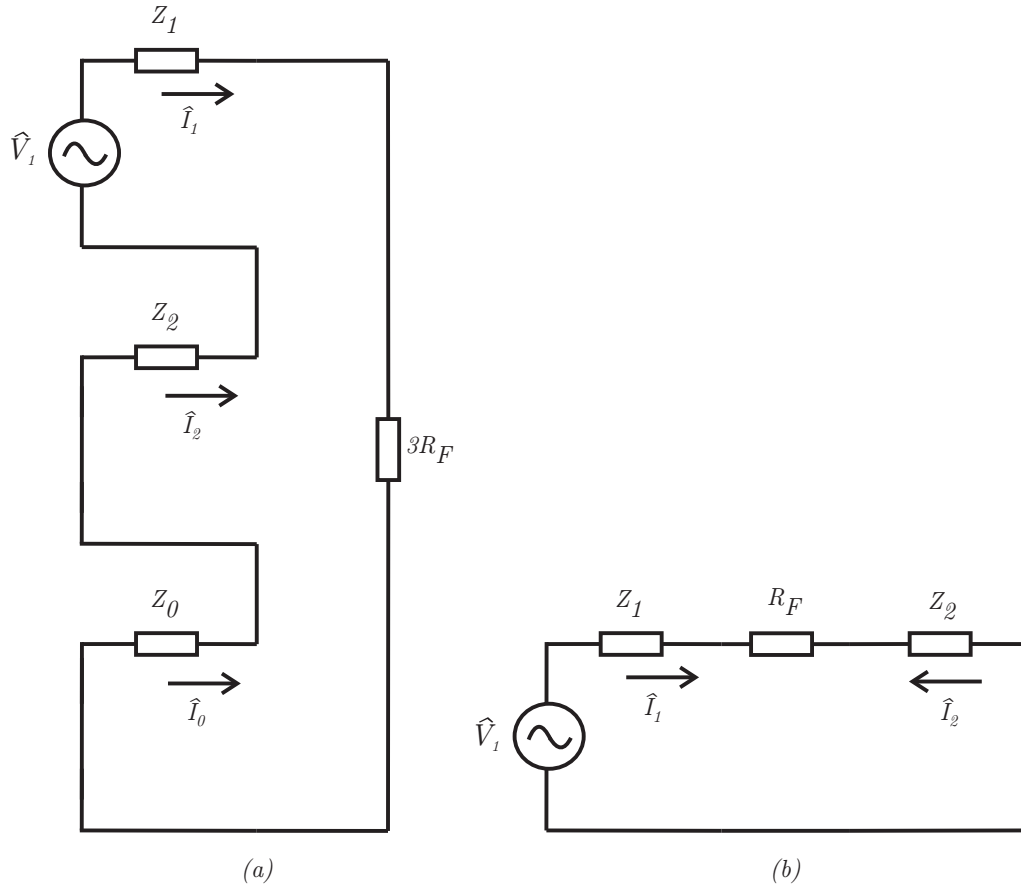


Figura 5.3. Componentes de seqüência para: (a) Falta AT e (b) Falta BC.

puro de falta. Baseando-se nisto, para o teste realizado, foram obtidos os seguintes valores:

$$\Delta \hat{I}_0 = \Delta \hat{I}_1 = \Delta \hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1}{2 \cdot Z_1 + Z_0} = 511,1237 \angle -77,0935^\circ A_{rms} . \quad (5.6)$$

As correntes incrementais de seqüência observadas na barra local (onde se assume que o relé de proteção se encontra instalado) podem ser obtidas por meio de um divisor de corrente aplicado em cada uma das redes de seqüência, obtendo-se:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{I}_{0_relay} &= \left(\frac{Z_{LTADJ2,0} + Z_{FR,0}}{Z_{FL,0} + Z_{LTADJ1,0} + Z_{LT,0} + Z_{LTADJ2,0} + Z_{FR,0}} \right) \cdot \Delta \hat{I}_0 \\ &= 69,6987 \angle -77,0935^\circ A_{rms} . \end{aligned} \quad (5.7)$$

Conseqüentemente:

$$\Delta \hat{I}_{A_relay} = 3 \cdot \Delta \hat{I}_{0_relay} = 209,0961 \angle -77,0935^\circ A_{rms} . \quad (5.8)$$

Assim sendo, utilizando-se desses valores de corrente incrementais e os substituindo na Tabela 5.1, pode-se obter o valor eficaz da corrente de loop medida, em módulo, pelo dispositivo

de proteção para as faltas monofásicas:

$$\begin{aligned}
|\Delta\widehat{I}_{ZAT}| &= \left| \Delta\widehat{I}_{A_relay} \angle Z_{LT,1} - \Delta\widehat{I}_{0_relay} \left(1 \angle Z_{LT,1} - \frac{|Z_{LT,0}|}{|Z_{LT,1}|} \angle Z_{LT,0} \right) \right| \\
&= |(209,0961 \angle -77,0935^\circ) \cdot (1 \angle 83,4318^\circ) \\
&\quad - (69,6987 \angle -77,0935^\circ) \cdot (1 \angle 83,4318^\circ - \frac{|316,0025|}{|60,4970|} \cdot 1 \angle 74,6708^\circ)| \\
&= 502,2862 A_{rms} .
\end{aligned} \tag{5.9}$$

Conforme apresentado na Seção 4.3.1.5, a supervisão por sobrecorrente é obtida a partir da construção de um sinal senoidal cujo valor de pico representa o valor da corrente de pickup. Dessa forma, para obter o ajuste $TP67G$, deve-se converter o valor de $|\Delta I_{ZAT}|$ para valor de pico, ou seja: $TP67G = \sqrt{2} \cdot |\Delta I_{ZAT}| = 710,3 \text{ A}$.

De maneira análoga, procede-se com a análise para faltas bifásicas. Na Figura 5.3(b), apresentam-se os elementos de sequência para uma falta bifásica. Assim como para o curto-circuito monofásico, considerou-se uma falta franca BC no terminal remoto, assumindo a configuração dos equivalentes de Thévenin igual ao caso anterior. Dessa forma, realizando os cálculos apropriados, foram obtidas as correntes incrementais de sequência para os defeitos bifásicos no ponto de falta:

$$\Delta\widehat{I}_1 = -\Delta\widehat{I}_2 = \frac{\widehat{V}_1}{2 \cdot Z_1} = 1841,7169 \angle -83,4318^\circ A_{rms} . \tag{5.10}$$

No relé da barra local, as correntes incrementais de sequência podem ser obtidas por meio de um divisor de corrente aplicado aos circuitos de sequência, resultando em:

$$\begin{aligned}
\Delta\widehat{I}_{1_relay} &= \left(\frac{Z_{LTADJ2,1} + Z_{FR,1}}{Z_{FL,1} + Z_{LTADJ1,1} + Z_{LT,1} + Z_{LTADJ2,1} + Z_{FR,1}} \right) \cdot \Delta\widehat{I}_1 \\
&= 251,1432 \angle -83,4318^\circ A_{rms}
\end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\Delta\widehat{I}_{2_relay} = 251,1432 \angle 96,5682^\circ A_{rms} . \tag{5.12}$$

A partir das relações observadas entre componentes de sequência e de fase para faltas bifásicas, é possível encontrar que:

$$\Delta\widehat{I}_{B_relay} = (a^2 - a) \cdot \Delta\widehat{I}_{1_relay} = 434,9928 \angle -173,4318^\circ , \tag{5.13}$$

$$\Delta\widehat{I}_{C_relay} = (a - a^2) \cdot \Delta\widehat{I}_{1_relay} = 434,9928 \angle 6,5682^\circ . \tag{5.14}$$

Dessa forma, utilizando-se desses valores de corrente incrementais de fase e os substituindo na Tabela 5.1, pode-se obter, em módulo, a corrente eficaz de loop medida pelo dispositivo de

proteção para as faltas bifásicas:

$$\begin{aligned}
 \left| \Delta \widehat{I}_{ZBC} \right| &= \left| \Delta \widehat{I}_{B_relay} \cdot 1 \angle Z_{LT,1} - \Delta \widehat{I}_{C_relay} \cdot 1 \angle Z_{LT,1} \right| \\
 &= \left| 434,9928 \angle -173,4318^\circ \cdot 1 \angle 83,4318^\circ - 434,9928 \angle 6,5682^\circ \cdot 1 \angle 83,4318^\circ \right| \\
 &= 869,97 A_{rms} .
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

Por fim, convertendo o valor eficaz obtido para valor de pico, calcula-se o ajuste de pickup para faltas bifásicas:

$$TP67P = \sqrt{2} \cdot |\Delta I_{ZBC}| = 1230,35 \text{ A} . \tag{5.16}$$

Com intuito de validar o procedimento de ajuste da supervisão de sobrecorrente a ser empregada nas funções do T400L, simularam-se faltas BC localizadas na barra remota do sistema teste, a 0,5 p.u. da barra local e a 0,5 p.u. além da barra remota, considerando a mesma topologia empregada durante o cálculo dos ajustes $TP67P$ e $TP67G$. O resultado obtido é apresentado na Figura 5.4. Conforme destacado na Seção 4.3.1.5, quando a corrente réplica incremental se iguala à corrente de pickup, as curvas integradas destas grandezas se sobrepõem, o que é observado para o caso simulado de falta na barra remota. Adicionalmente, verifica-se que para o curto próximo do terminal monitorado, a corrente integrada supera rapidamente o pickup, enquanto que para o curto-circuito externo além da barra remota, a corrente integrada permanece abaixo da curva do pickup. Enfatiza-se que mesmo perante a influência de uma faixa de harmônicos da frequência fundamental (até 1 kHz) na corrente réplica incremental, a integral desta corrente ainda se comportou conforme esperado.

5.2.2 Ajustes da Função TD32

As impedâncias de ajustes $TD32ZF$ e $TD32ZR$ utilizadas na obtenção dos torques de restrição da TD32 são definidas a partir de diferentes considerações a respeito da homogeneidade de SEEs. Conforme apresentado na Seção 4.3.1.1, nos SEEs homogêneos, ou seja, nos sistemas em que as impedâncias da LT e de seus circuitos adjacentes têm o mesmo ângulo de fase e possuem uma mesma relação de razão entre a impedância de sequência positiva e zero (KASZTENNY *et al.*, 2016), o relé mede com boa precisão, para defeitos à frente, o negativo da magnitude da impedância vista atrás do mesmo, enquanto que para defeitos reversos, o

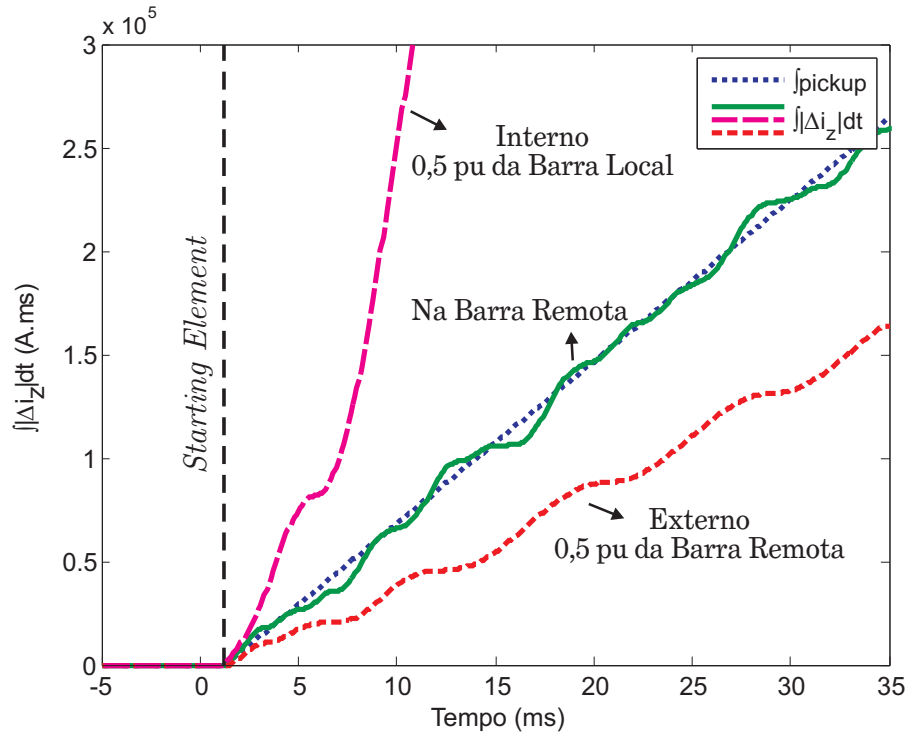


Figura 5.4. Validação do procedimento de ajuste dos parâmetros de sobrecorrente do esquema POTT.

dispositivo de proteção mede a magnitude da soma das impedâncias à sua frente. Entretanto, para sistemas não-homogêneos, a impedância aparente medida está condicionada à erros.

O fabricante do T400L apresenta cálculos através dos quais erros esperados para a impedância vista pela TD32 são obtidos, considerando um dado sistema não-homogêneo (KASZTENNY *et al.*, 2016). Desses estudos, verifica-se a necessidade de criar limiares adaptativos com uma margem de segurança, evitando-se assim atuações indevidas em decorrência da não-homogeneidade dos sistemas. Desse modo, com base nos erros apresentados por Kasztenny *et al.* (2016), propõe-se que os ajustes $TD32ZF$ e $TD32ZR$ sejam:

$$TD32ZF = 0,3 \cdot \text{MIN}(|Z_{FL,1}|) , \quad (5.17)$$

$$TD32ZR = 0,3 \cdot (|Z_{LT,1}|) , \quad (5.18)$$

onde $TD32ZF$ é a menor impedância observada no equivalente local da LT monitorada.

Assim, para o valor de SIR mínimo adotado no sistema teste indicado na Figura 5.1, ou seja, $SIR = 0,5$, obtêm-se os valores dos ajustes de impedância utilizados neste trabalho:

$$TD32ZF = 9,07 \, \Omega , \quad (5.19)$$

$$TD32ZR = 18,15 \, \Omega . \quad (5.20)$$

5.2.3 Ajustes da Função TD21

A função de distância por subalcance, aplicada no domínio do tempo, possui como ajustes de campo os alcances relacionados aos loops de falta fase-terra e fase-fase, representados por $TD21MG$ e $TD21MP$, respectivamente. Além disso, também são requeridos os ajustes da supervisão de sobrecorrente, os quais já foram demonstrados anteriormente neste mesmo capítulo.

Os ajustes de alcance das proteções de distância são escolhidos como uma parcela do comprimento em p.u. da LT protegida. Nos algoritmos de distância tradicionais, faltas em primeira zona conduzem à operação instantânea da função de proteção. Portanto, é esperado que, para todas as faltas internas à LT, funções de proteção desse tipo atuem o mais rápido possível com segurança. Entretanto, durante o processo de estimação da localização do defeito, o qual é obtido a partir dos sinais de corrente e tensão medidos, observam-se fontes de erros relacionadas aos transformadores para instrumentos, dados de impedância da linha, efeito capacitivo da LT, entre outras, tornando a localização imprecisa para LTs mais longas (ZIEGLER, 2006). Por isso, tipicamente, os ajustes de alcance em primeira zona não são maiores que 80% do comprimento da LT, conforme reportado em Ziegler (2006).

Na TD21, somado aos erros supracitados, destacam-se também desvios referentes aos transitórios eletromagnéticos presentes nos sinais de tensão e corrente e que são inerentes à operação dos SEEs. Esses transitórios podem sobrealcancar o relé em alguns eventos na LT quando estes ocorrem próximos ao final da zona de proteção do elemento de distância. Por isso, com o intuito de promover segurança à função TD21, os ajustes $TD21MP$ e $TD21MG$ também não abrangem todo o comprimento da LT, consistindo em alcances ainda menores do que os utilizados tradicionalmente em funções de distância baseadas em fasores.

Kasztenny *et al.* (2016) destacam que a soma dos erros relacionados aos transformadores para instrumentos e das discrepâncias nos dados da LT produzem variações nos alcances medidos na ordem de 10% a 15% do comprimento em p.u. da LT. Além disso, Schweitzer *et al.* (2016) demonstram que os erros de sobrealcance na TD21 relacionados aos transitórios presentes nos sinais monitorados são menores do que 10% do comprimento em p.u. da LT. Assim, no relé SEL-T400L, considerando as fontes de erro citadas e sabendo que os dados de impedância

de sequência zero da LT são, em geral, menos precisos que os de sequência positiva (KASZTENNY *et al.*, 2016), recomenda-se o uso dos seguintes alcances da função TD21 para os loops fase-fase e fase-terra, respectivamente:

$$TD21MP = 0,75 \text{ p.u.} , \quad (5.21)$$

$$TD21MG = 0,7 \text{ p.u.} . \quad (5.22)$$

5.2.4 Ajustes da Função TW87

De acordo com o princípio de operação da TW87 apresentado na Seção 4.3.4, o conhecimento do tempo de trânsito τ das OV's na LT protegida, o qual é representado pelo ajuste $TWLPT$, é crucial para a implementação da referida função, uma vez que é por meio deste dado que são criadas as janelas de busca das OV's a serem consideradas no cálculo da grandeza de restrição do elemento diferencial. Por isso, o fabricante do T400L recomenda a medição de τ em procedimentos de energização da LT durante o comissionamento do relé ao invés do uso de parâmetros previamente conhecidos, garantindo assim a maior precisão possível no valor resultante do ajuste $TWLPT$.

O procedimento a ser seguido para cálculo de $TWLPT$ encontra-se ilustrado na Figura 5.5. Com o disjuntor do terminal remoto em aberto, fecha-se o disjuntor do terminal local, iniciando a energização da LT. Feito isso, deve-se medir o tempo associado para que a OV lançada a partir do disjuntor local reflita no terminal remoto e retorne ao terminal local. Este tempo equivale a duas vezes o tempo de trânsito da LT, visto que a OV induzida na energização percorre todo o comprimento da LT em duas vezes.

O procedimento apresentado na Figura 5.5 é realizado com o dispositivo de proteção em campo. Para reproduzir este procedimento da forma mais realística possível, as etapas de cálculo do ajuste $TWLPT$ serão reproduzidas neste trabalho, conforme detalhado por Kasztenny

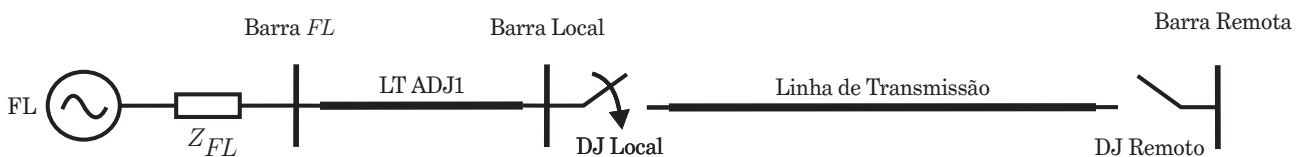


Figura 5.5. Energização da linha de transmissão.

et al. (2016). Inicialmente, procede-se com a extração das OV's usando o filtro DS. Em seguida, das OV's resultantes, calculam-se as componentes modais de modo aéreo, fazendo uso da transformada de Clarke (PHADKE; THORP, 2009). É a partir dessas componentes modais que o valor de τ a ser utilizado no ajuste *TWLPT* é calculado.

Na Figura 5.6, apresentam-se as correntes de fase para a energização da LT do sistema da Figura 5.1. Conforme destacado por Kasztenny *et al.* (2016), a análise das OV's deve ser realizada na fase cujo polo fechou por último, reduzindo erros durante a detecção da OV refletida no terminal remoto. Como o ATP é um ambiente controlável, nos resultados aqui apresentados, o instante de fechamento dos polos do disjuntor foi idêntico. Dessa forma, a fase selecionada para análise das OV's foi escolhida como sendo a que resultou em transitórios de maior amplitude, ou seja, a fase A, conforme destacado na Figura 5.6.

Ressalta-se que, durante a energização da LT, quão mais forte for a fonte do sistema no lado do terminal local, maior será a magnitude da OV de corrente medida, pois maiores serão as reflexões com mesma polaridade em relação às OV's incidentes. Dessa forma, apenas para fins de ilustração, nos testes apresentados neste trabalho, foi adotado o valor de $SIR_L = 0,5$.

O sinal que descreve a componente modal alfa filtrada por meio do filtro DS é apresentada na Figura 5.7. Nos SEEs que possuem LTs adjacentes à LT energizada, tal como o sistema teste

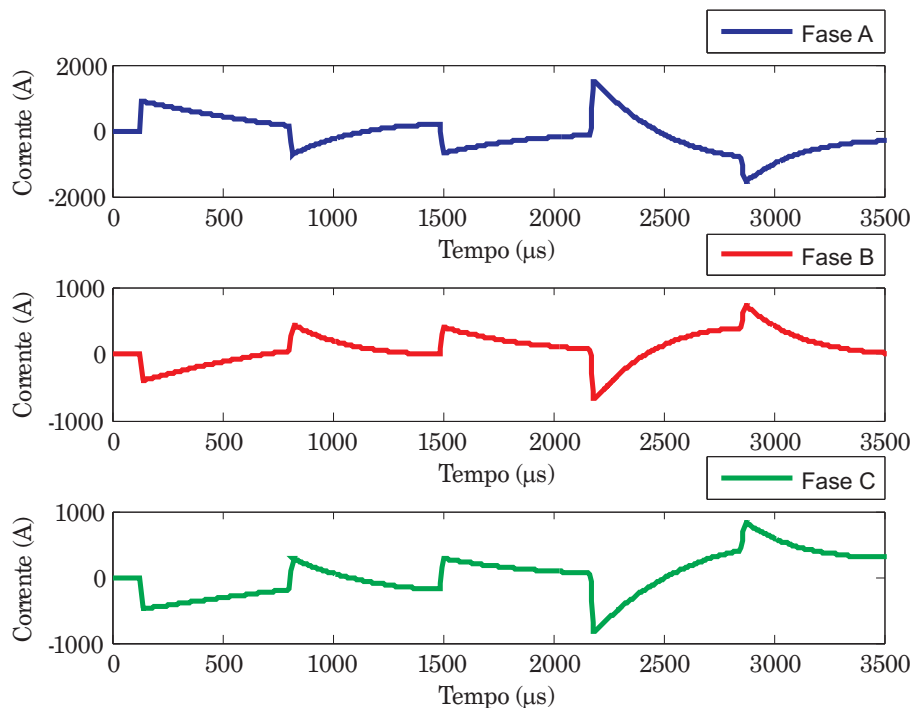


Figura 5.6. Correntes de fase capturadas durante a energização da LT.

avaliado, podem ser observadas OV's de corrente que são provenientes de reflexões em terminais adjacentes ao monitorado, conforme indicado na Figura 5.7. Assim sendo, usando apenas meios visuais para identificação da frente de onda de interesse, torna-se difícil detectar corretamente a OV de corrente refletida do terminal remoto da LT energizada. Dessa forma, sabendo que as OV's se propagam em LTs aéreas com velocidade aproximada à da luz (GLOVER *et al.*, 2011), obtém-se inicialmente uma estimativa grosseira de τ usando informações previamente conhecidas do comprimento da linha. Para o sistema teste, $TWLPT$ aproximado obtido foi:

$$2 \cdot TWLPT_{aprox} = \frac{2 \cdot L}{c} = \frac{2 \cdot 200}{300000} = 1333,33 \mu s, \quad (5.23)$$

em que c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

Dessa forma, ao instante de tempo da primeira OV lançada a partir do disjuntor local é somado o valor de $2 \cdot TWLPT_{aprox}$. Com o valor obtido, pode-se então identificar a região no tempo na qual aparecerá a OV refletida no terminal remoto, tornando possível refinar o valor do tempo de trânsito calculado. Esta consideração pode ser confirmada na Figura 5.7. De fato, adotando o instante de fechamento do disjuntor como referência, é esperado que a OV refletida no terminal remoto seja medida em torno de $1333,33 \mu s$. Tal constatação elimina a possibilidade de confundir a OV refletida do terminal remoto com a OV refletida em terminais adjacentes, conferindo robustez ao cálculo do ajuste $TWLPT$. Portanto, ao identificar o instante exato da

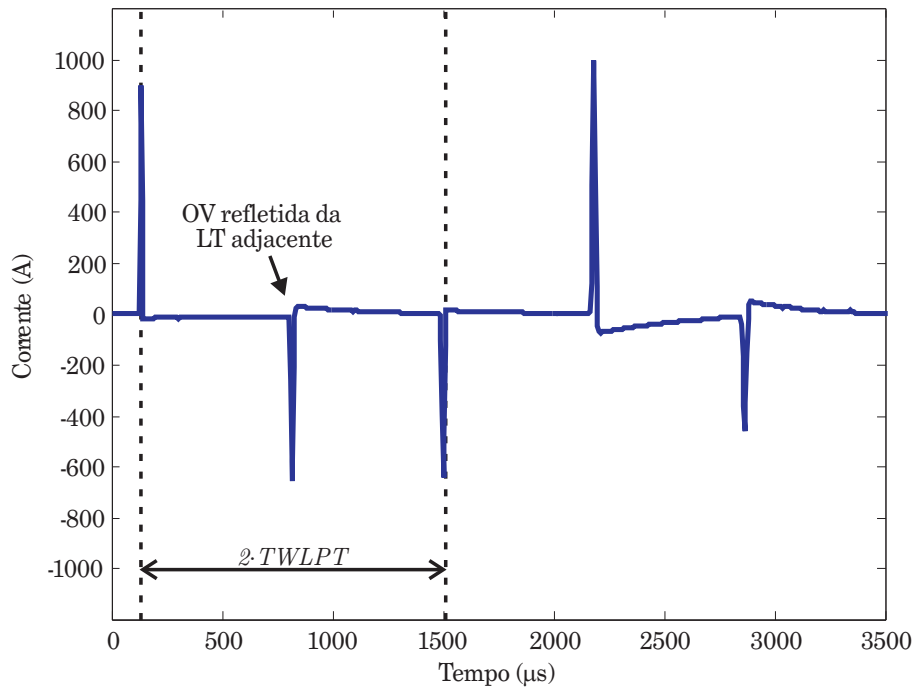


Figura 5.7. Componente alfa de Clarke obtida das OV's de corrente da fase A.

reflexão oriunda do terminal remoto, para o sistema considerado, obteve-se:

$$TWLPT = \frac{1365 \mu s}{2} = 682,5 \mu s . \quad (5.24)$$

A função TW87 ainda requer ajustes relacionados à supervisão por sobrecorrente. Esses ajustes para o caso de LTs sem compensação série capacitiva são exatamente os mesmos já comentados em seções anteriores. Entretanto, são usados ajustes com outros nomes, a saber $TP50P$ e $TP50G$, para que sejam independentes dos ajustes empregados na TD21 e TD32. De fato, enquanto a TW87 não é, a priori, afetada pela compensação série de LTs, as funções TD21 e TD32 são, de modo que, em determinadas situações requerem ajustes diferentes da supervisão de sobrecorrente da TW87 (KASZTENNY *et al.*, 2016). No entanto, uma vez que neste trabalho o sistema teste não contém compensação série, são empregados ajustes idênticos de supervisão por sobrecorrente aos obtidos para os loops fase-fase e fase-terra do esquema $POTT$, respectivamente:

$$TP50P = TP67P = 1230,35 \text{ A} , \quad (5.25)$$

$$TP50G = TP67G = 710,3 \text{ A} . \quad (5.26)$$

5.3 AJUSTES DE FÁBRICA ADOTADOS

Conforme apresentado no Capítulo 4, os ajustes de fábrica são essenciais para segurança, integridade e velocidade de operação das funções de proteção disponíveis no relé SEL-T400L. Porém, informações sobre esses ajustes não são reportados na literatura aberta e nem nos documentos relacionados ao T400L, de modo que, para a realização de testes confiáveis e coerentes, é de suma importância que estes valores sejam escolhidos de forma coerente.

Neste trabalho, os valores adotados para os ajustes de fábrica foram obtidos a partir da análise de diversos casos de curto-circuito, de estudos matemáticos quando possível seguindo os procedimentos expostos por Kasztenny *et al.* (2016) e da observação das respostas do T400L divulgadas em artigos científicos do próprio fabricante, de tal forma a garantir segurança aos algoritmos simulados e não tornar os resultados errôneos ou tendenciosos.

Na Tabela 5.2, são apresentados os valores dos ajustes de fábrica utilizados nas simulações realizadas. Para melhor entendimento da função dos ajustes, a Tabela 4.2 apresentada no

Capítulo 4 pode ser consultada. Para o filtro DS, foi utilizado $N_{DS} = 4$. Ademais, para as margens de segurança das funções TD32 e TW32, adotou-se um valor de 10% da potência natural da LT, e para a restrição e margem de segurança da TD21, utilizou-se metade do valor de pico da tensão de fase da LT.

Tabela 5.2. Ajustes de fábrica utilizados.

Elemento	Ajuste	Valor utilizado
TW32	i_{TW32_MIN}	200 A
	v_{TW32_MIN}	5000 V
	MS_{TW32}	36 MVA
	T1	40 μs
TD32	MS_{TD32}	36 MVA
	T2	0,5 ms
TD21	V_{MIN}	200 kV
	MS_{TD21}	200 kV
TW87	P	48 A
	K	1
	S	0,5
	$\Delta\tau$	10 μs

RESULTADOS OBTIDOS

Com o objetivo de validar o procedimento adotado na parametrização dos ajustes de campo do T400L e apresentar o funcionamento das funções de proteção implementadas, foram simulados alguns cenários de falta comuns à operação de SEEs reais. Neste trabalho, cada cenário será denominado de Análise Transitória de Curto-Circuito (ATC), visto que as simulações não envolvem análises em regime permanente no domínio fasorial.

Na Figura 6.1, apresentam-se os locais de aplicação de falta no sistema teste simulado e, na Tabela 6.1, as características elétricas referentes e tempos de atuação verificados para cada um dos ATCs analisados. Cabe ressaltar que o tempo de atuação da função TD21 é referente ao relé do terminal local da LT, visto que foi considerada sua aplicação isolada sem uso do esquema DTT.

Para os tempos de atuação apresentados, não é considerado o atraso associado ao canal de comunicação disposto entre os relés. O local de aplicação de falta de cada ATC é diretamente relacionado ao índice dos pontos de falta destacados na Figura 6.1, ou seja, os casos ATC 1a e 1b são aplicados no ponto $F1$, o ATC 2, no ponto $F2$ e assim sucessivamente. Quanto ao ângulo de incidência de falta, aqui chamado de θ , foram adotados valores tomando como referência os sinais elétricos da tensão da fase A no terminal local. Por fim, considerou-se, para todos os casos simulados um ângulo de carregamento de $\delta = 20^\circ$ (abertura angular entre as fontes de tensão dos equivalentes de Thévenin conectadas nas extremidades do sistema).

A seguir, serão apresentadas as análises do desempenho das proteções para cada um dos casos apresentados na Tabela 6.1. Todas as figuras que serão apresentadas referem-se as unidades ou fases sensibilizadas.

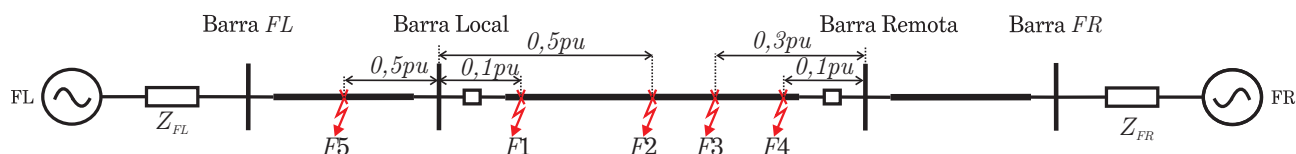


Figura 6.1. Locais de aplicação de falta para análise de desempenho das funções de proteção avaliadas.

Tabela 6.1. Tempo de atuação das proteções para cada um dos ATCs analisados.

ATC	SIR	R_F	θ	Tipo de Falta	Unidade Sensibilizada	Tempo de Atuação			
						TW32	TD32	TD21	TW87
1a	0,5	50 Ω	90°	Interna AT	AT	0,6 ms	1,9 ms	8,6 ms	1,3 ms
1b	0,1	5 Ω	90°	Interna AT	AT	0,6 ms	1,9 ms	4,0 ms	1,3 ms
2	1,2	0 Ω	90°	Interna AB	AB	0,4 ms	1,7 ms	10,6 ms	1,6 ms
3	0,5	0 Ω	0°	Interna AT	AT	—	3,0 ms	—	—
4	0,5	0 Ω	90°	Interna ABC	CA	0,6 ms	1,7 ms	—	1,6 ms
5	0,5	0 Ω	90°	Externa ABT	AB	—	—	—	—

6.1 ANÁLISE TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO 1 — ATC 1

O ATC 1 foi dividido em dois cenários distintos para exemplificar a influência do SIR e da resistência de falta sobre os algoritmos avaliados. Inicialmente, tem-se como objetivo analisar o comportamento do T400L perante condições de resistência de falta elevada.

Na Figura 6.2, apresentam-se as OV's, o torque de operação integrado e as *word-bits* de operação da TW32 para os relés nos terminais da LT. Conforme mencionado na Seção 4.3.3, para faltas internas à LT monitorada, as OV's de tensão e corrente encontram-se com polaridades opostas, o que pode ser identificado na Figura 6.2. Conseqüentemente, o torque integrado E_{FWD} é positivo e, portanto, tão logo E_{FWD} supera a margem de segurança da TW32 em ambos os terminais da LT, os relés identificam distúrbio direto. Passados exatos $T1$ segundos após o instante de identificação das primeiras OV's, uma vez que a condição de curto direto permanece ativa, os disparos permissivos dos terminais sensibilizados são enviados para os dispositivos de proteção do terminal oposto. Quando ambos os relés dos terminais da LT ativam a *word-bit* $TW32_{FWD}$, a função então sela a sua variável de operação, emitindo um *trip* aos disjuntores associados. Ainda, percebe-se que, devido ao princípio de operação baseado em OV's, a TW32 identifica o defeito na LT em algumas centenas de microssegundos, resultando em um tempo de atuação de 0,6 ms.

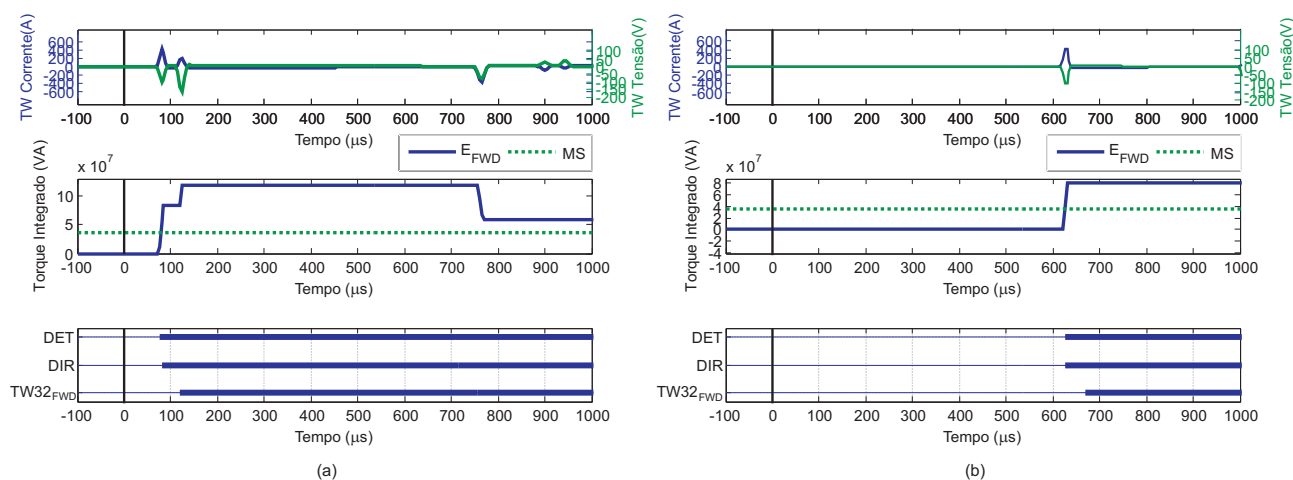


Figura 6.2. ATC 1a — OVs de tensão e corrente, torque integrado e *word-bits* de operação da TW32 para: (a) relé do terminal local e (b) relé do terminal remoto da LT.

Na Figura 6.3, apresentam-se os torques de operação e restrição, os torques integrados e as *word-bits* de operação da TD32 para os relés dos terminais da LT. Nota-se que os torques de operação da TD32 permitem uma indicação da direção do curto-circuito segura e confiável, obtida a partir das margens entre o torque de operação T_{OP} e o torque de restrição para defeitos reversos T_{REV} , assim como entre T_{OP} e o torque de restrição para defeitos a frente T_{FWD} , respectivamente. Observa-se também, nesta figura, o benefício promovido pelo reforço nos torques de operação e restrição nos primeiros instantes da falta. Quando integrados estes reforços, a TD32 rapidamente identifica a direção do defeito na LT, conforme verificado por meio do estado da *word-bit* DIR. Ainda, de acordo com o apresentado na Seção 4.3.1.2, conclui-se que as tensões e correntes incrementais de fase indicam corretamente a direção da falta.

Do resultado obtido, observa-se que, a partir do instante em que a supervisão por sobrecorrente é habilitada, ou seja, quando o *flag* 50 muda de estado, a TD32 ativa o disparo permissivo de atuação, alterando o estado da *word-bit* $TD32_{FWD}$, enviando-o em direção ao relé do terminal oposto, conforme demonstrado na Figura 6.3. No instante de tempo em que ambos os relés ativam os disparos permissivos, a TD32 está habilitada para o comando de abertura dos disjuntores da LT, emitindo um sinal de *trip*. No caso analisado, o tempo de atuação foi de aproximadamente em 1,9 ms.

Na Figura 6.4, são apresentadas as tensões de operação e restrição, a diferença de tensão integrada e as *word-bits* de operação da TD21. Constata-se que, mesmo perante condições elevadas de resistência de falta, o que influencia diretamente na tensão de operação da TD21, a

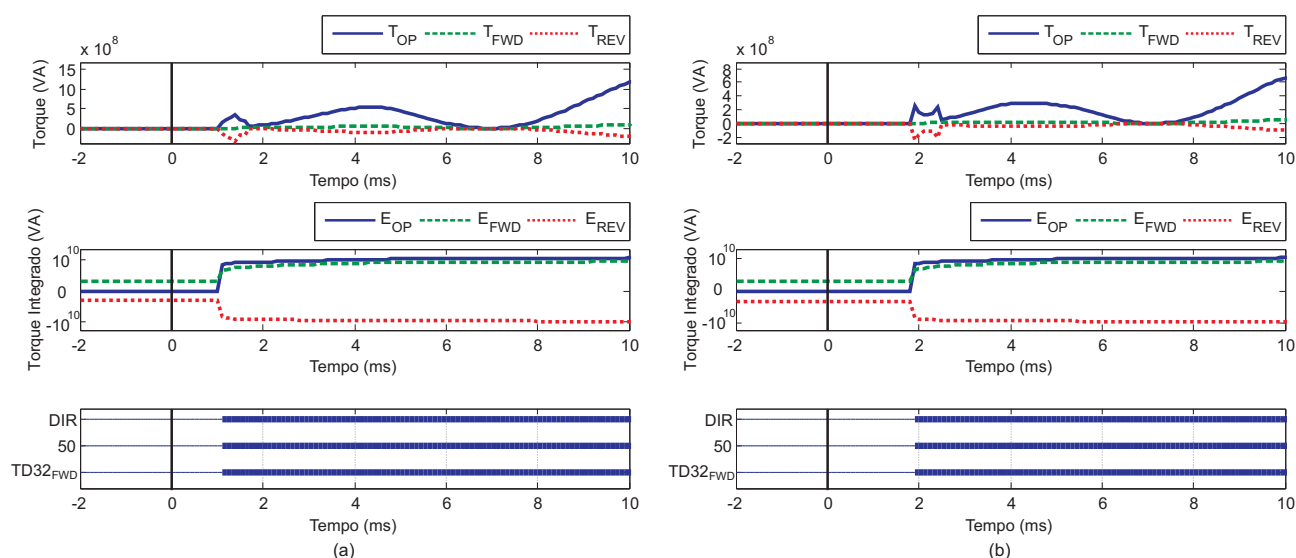


Figura 6.3. ATC 1a — Torques de operação e restrição, torques integrados e *word-bits* de operação da TD32 para: (a) relé do terminal local e (b) relé do terminal remoto da LT.

função apresenta uma margem de segurança de indicação de curto-circuito significativa (margem entre V_{OP} e V_{RST}). Assim sendo, tão logo sejam satisfeitas as demais condições de segurança da TD21, tais como as que ativam o integrador e observada diferença de tensão integrada maior que a margem de segurança, habilita-se a *word-bit* TD21, responsável por indicar que o distúrbio se encontra dentro da zona protegida. Assim, no instante em que a supervisão por sobrecorrente é ativada, a TD21 dispara o sinal de *trip* aos disjuntores da LT, neste caso, sem a necessidade de comunicação com o dispositivo de proteção do terminal oposto. Cabe ressaltar que um esquema de teleproteção DTT poderia ter sido empregado, conforme explicado nos capítulos anteriores. Nesta situação, a TD21 atuou em 8,6 ms.

Apresentam-se, na Figura 6.5, as OV's de corrente e as *word-bits* de operação da TW87 por fase. Na figura, as duas primeiras linhas tracejadas indicam os instantes de chegada das primeiras OV's em ambos os terminais, seguidas por quatro linhas contínuas que delimitam as janelas de busca das OV's de saída nos terminais opostos aos tomados como referência. Uma vez que no ATC 1a o ponto de aplicação do defeito encontra-se próximo ao terminal local da LT, o instante de tempo em que a primeira OV de corrente incide neste terminal é menor do que o associado ao da primeira onda do terminal remoto. Tão logo identificadas as primeiras OV's nos terminais da LT, são estabelecidas janelas de busca centradas no tempo de propagação da linha, com o intuito de identificar as ondas de saída no terminal oposto ao da primeira onda identificada. Assim, permite-se obter a variável de restrição da função diferencial.

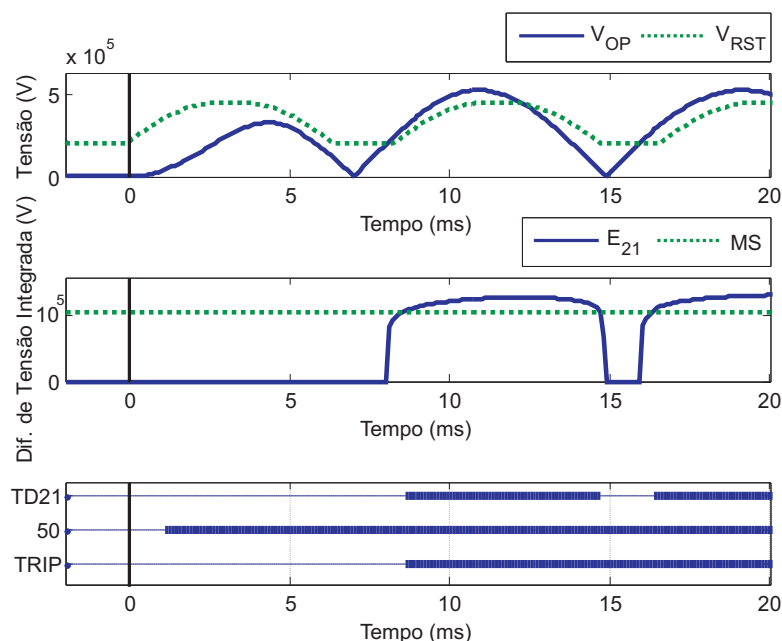


Figura 6.4. ATC 1a — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e *word-bits* de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.

Para as faltas internas à LT, conforme apresentado no Capítulo 4, o tempo de deslocamento das OV's lançadas pelo defeito até os terminais da LT são menores que o tempo de trânsito da linha. Conseqüentemente, a variável de restrição da proteção será baixa, pois não é encontrada, na janela de busca, uma quantidade significativa de energia associada às OV's de corrente. Assim sendo, para faltas internas, a variável de operação i_{DIF} , é mais elevada que a de restrição i_{RST} , observando-se para o ATC 1a: $i_{DIF} = 1114$ A e $i_{RST} = 607$ A, o que demonstra que a TW87 detecta defeitos internos à linha com bastante segurança. Então, no instante de tempo em que a supervisão por sobrecorrente é ativada, a TW87 sela a *word-bit* referente a operação na fase com falta, neste caso, *TW87A*. Por fim, constata-se que o padrão de magnitude e polaridade das ondas viajantes para cada uma das fases da linha permite que o dispositivo selecione corretamente o tipo do defeito, bloqueando a operação da TW87 para as fases sãs.

Considerando os resultados obtidos, nota-se que, embora o curto-circuito apresente uma resistência de falta de 50Ω , os ajustes utilizados resultaram em atuações rápidas e corretas das funções implementadas. A mais lenta foi a TD21, o que era esperado, devido à influência que a resistência de falta exerce sobre a tensão de operação dessa função. Ainda, deve-se ressaltar que o SIR de 0,5 foi calculado a partir da associação série das LTs adjacentes com a principal, de modo que, embora tenha baixo valor, pode não resultar nas maiores contribuições de curto possíveis, retardando a operação da proteção de distância no domínio do tempo.

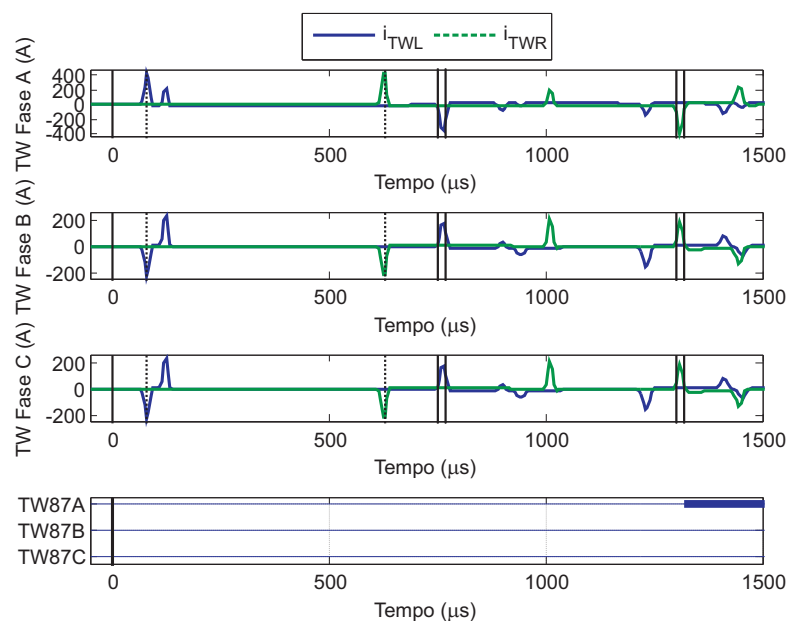


Figura 6.5. ATC 1 — OVs de corrente e *word-bits* de operação por fase da TW87.

Para exemplificar uma situação menos adversa de curto-circuito, o caso ATC 1b repete o primeiro cenário (ATC 1a), porém considerando um SIR na barra local de 0,1 e uma resistência de falta dez vezes menor, ou seja 5Ω . Conforme ilustrado na Tabela 6.1, apenas a função TD21 mudou o tempo de operação, reduzindo-o de 8,6 ms para 4 ms em relação ao instante inicial do defeito. Para um melhor entendimento dessa mudança no tempo de operação, apresenta-se na Figura 6.6 o comportamento dos elementos da função TD21. Do exposto, percebe-se que, diferentemente do caso anterior, a tensão de operação excede a tensão de restrição nos primeiros instantes do curto-circuito, fazendo com que o sinal integrado supere a margem de segurança mais rapidamente. Neste caso, a supervisão por sobrecorrente é ativada antes mesmo da TD21, resultando no tempo de atuação de 4 ms mencionado anteriormente.

6.2 ANÁLISE TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO 2 — ATC 2

Com o intuito de analisar a operação das funções de proteção disponíveis no T400L quando o SEE se encontra operando sob condições de fontes fracas, ou seja, com contribuição das fontes reduzidas, simulou-se o ATC 2. Neste caso, o SIR foi aumentado para 1,2, ficando com valor de aproximadamente duas vezes maior do que os considerados no ATC 1a e 1b.

Para a variação de SIR simulada neste caso, as funções de proteção TW32, TD32 e TW87 mostraram-se robustas, pois o tempo de atuação de cada uma delas não apresentou variação

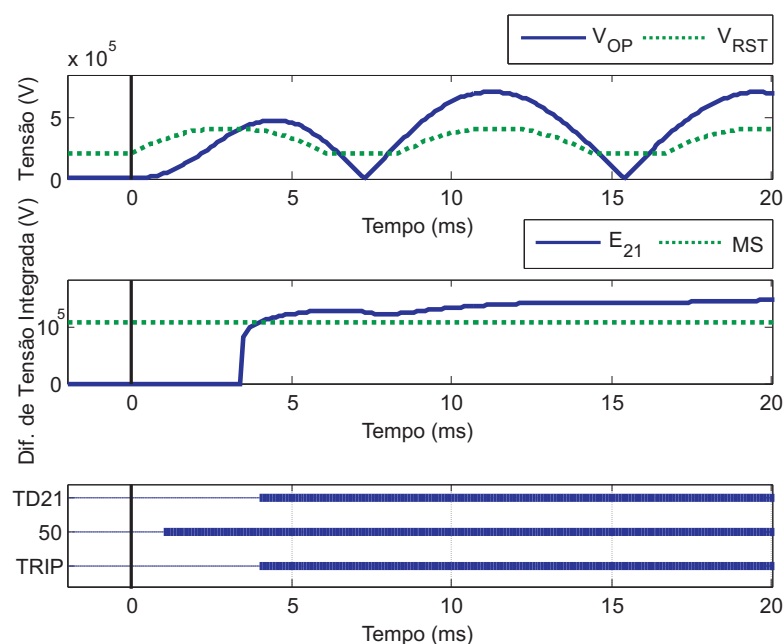


Figura 6.6. ATC 1b — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e *word-bits* de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.

significativa em relação aos apresentados para o ATC 1a e 1b, exceto a função TD21 que apresentou um aumento no tempo de atuação da ordem de 2 ms.

Na Figura 6.7, as tensões de operação e restrição, a diferença de tensão integrada e as *word-bits* de operação da TD21 são apresentadas. Comparando-se esta figura com as Figuras 6.4 e 6.6, percebe-se que o aumento do SIR provocou o aumento da tensão de restrição de TD21, retardando o tempo de atuação da proteção. Conforme apresentado no Capítulo 4, a variável de restrição da TD21 é obtida a partir das tensões e correntes de pré-falta e, conseqüentemente, uma variação de SIR diminui as contribuições de corrente das fontes do sistema. Assim, aumenta-se a tensão de restrição da proteção. Neste caso, cabe ainda frisar que embora a atuação tenha ocorrido, a tensão integrada passou pouco da margem de segurança, indicando a iminência de não atuação da função neste caso. Ainda assim, uma vez que as demais funções atuaram rapidamente, a atuação final do T400L não seria comprometida.

6.3 ANÁLISE TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO 3 — ATC 3

A partir do ATC 3, pretende-se mostrar o efeito do ângulo de incidência de falta nas funções de proteção avaliadas e o comportamento da TD21 perante faltas aplicadas no alcance da proteção. Conforme apresentado na Tabela 6.1, as funções TW32 e TW87 não atuaram para

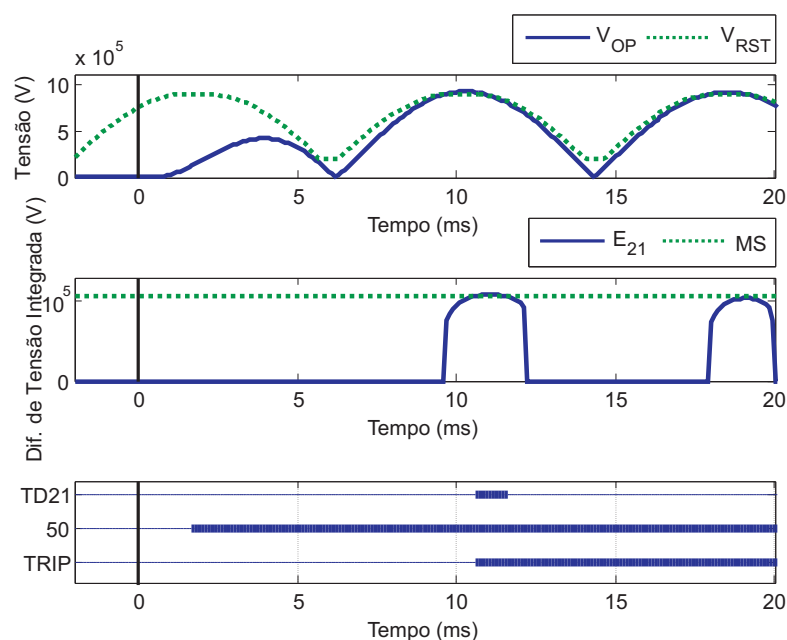


Figura 6.7. ATC 2 — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e *word-bits* de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.

este caso de curto-circuito. A não atuação dessas proteções decorre de que, para ângulos de incidência de faltas próximos de zero, não são lançadas, no ponto de defeito, OV (KASZTENNY *et al.*, 2016), evitando a sensibilização das funções TW32 e TW87. Esta observação é uma limitação das funções de proteção que têm o princípio de operação baseado na teoria das OVs.

Para as funções TD32 e TD21, ângulos de incidência próximos a zero promovem baixa variação nas grandezas incrementais nos primeiros instantes de falta, mas não necessariamente evitam sua atuação, ou seja, a operação continua dependendo das características do distúrbio. De fato, a energia de falta em seus primeiros instantes é menor em relação aos casos de ângulos de incidência próximos ao pico da tensão de referência, o que retarda as atuações das proteções TD32 e TD21 (RIBEIRO *et al.*, 2016). Esta constatação é demonstrada por meio da Figura 6.8, onde são apresentados os torques integrados da função TD32.

Conforme apresentado na Seção 4.3.2.1, quando o ponto de aplicação de falta na LT se aproxima do ponto de alcance da proteção, a tensão de operação tende a se igualar à tensão de restrição, o que é observado na Figura 6.9. Conseqüentemente, a TD21 ou não apresentará diferença de tensão integrada ou, quando assim possuir, não o será em quantidade suficiente para ultrapassar a margem de segurança da função, a depender das condições de SIR do SEE em questão (KASZTENNY *et al.*, 2016). Por isso, conforme esperado, no ATC 3, a TD21 não atuou, pois a tensão integrada não superou a margem de segurança.

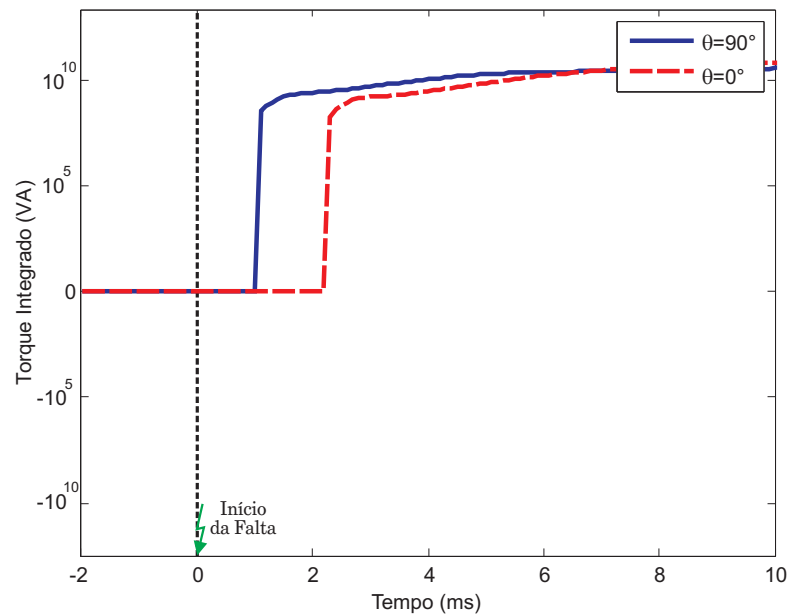


Figura 6.8. Energia nos primeiros instantes de falta para diferentes ângulos de incidência de falta.

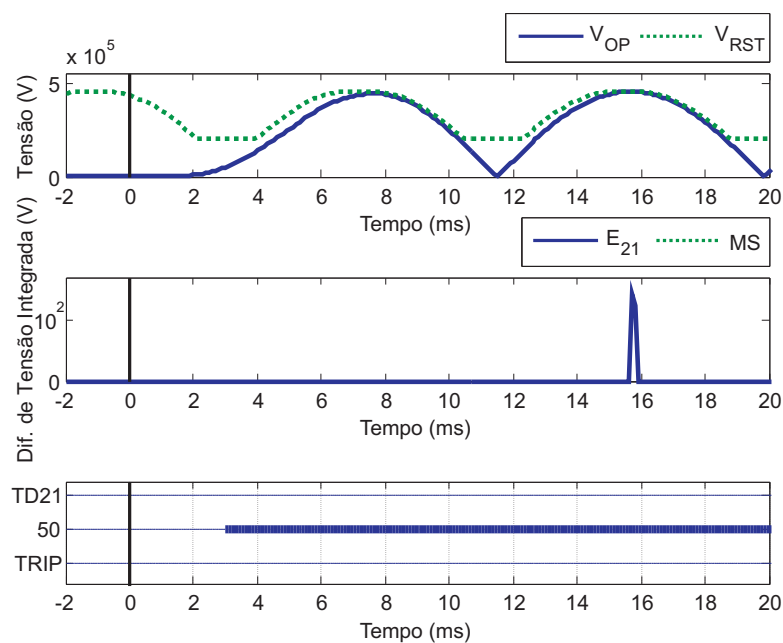


Figura 6.9. ATC 3 — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e *word-bits* de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.

6.4 ANÁLISE TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO 4 — ATC 4

Com o ATC 4, analisa-se o comportamento das funções de proteção para faltas trifásicas, as quais são responsáveis pelos maiores níveis das correntes de curto-circuito nos SEEs. De acordo com a Tabela 6.1, todas as funções de proteção atuaram rapidamente, exceto a TD21, uma vez que a falta aplicada é externa à zona de proteção da função. Entretanto, como o defeito aplicado é interno para o relé do terminal remoto, a TD21 deste dispositivo atuou em 5,5 ms.

De acordo com o que fora descrito no Capítulo 4, para faltas trifásicas, qualquer loop de falta pode ser sensibilizado. Assim, para a TD21 do relé remoto e para a TD32, o loop de falta sensibilizado foi o CA, responsável por apresentar as maiores variações de tensão no sistema, fazendo a TD32 atuar em 1,7 ms. Para as funções baseadas em OV, as três fases foram sensibilizadas. Conseqüentemente, as funções se mostraram seguras e rápidas, resultando em tempos de atuação de 0,6 ms e 1,6 ms das funções TW32 e TW87, respectivamente.

6.5 ANÁLISE TRANSITÓRIA DE CURTO-CIRCUITO 5 — ATC 5

A partir do ATC 5, avalia-se o comportamento das funções de proteção perante a ocorrência de curtos-circuitos externos à LT protegida. Apresentam-se, na Figura 6.10, as OV, o torque de operação integrado e as *word-bits* de operação da TW32 para as fases A e B em ambos os terminais da linha.

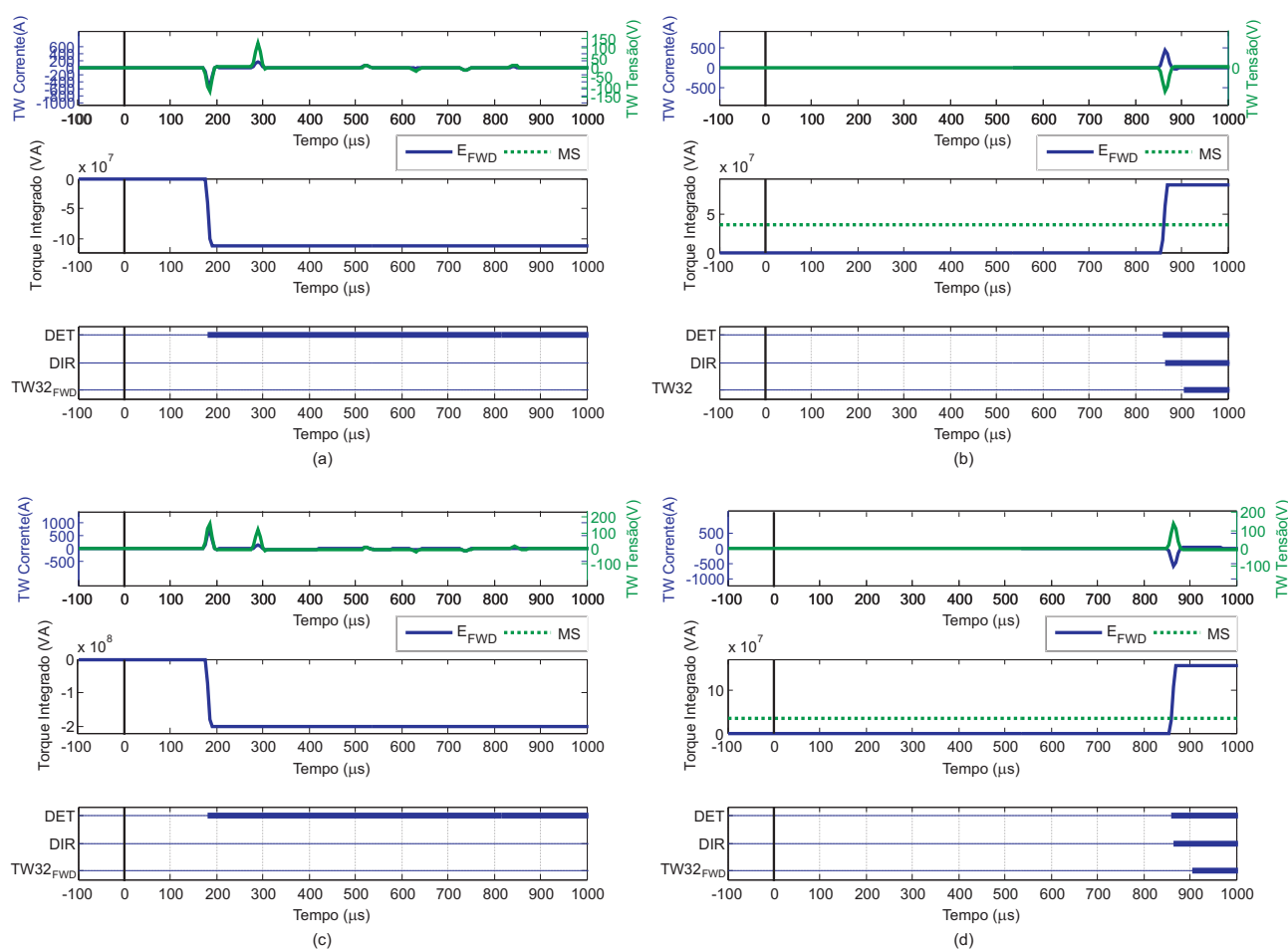


Figura 6.10. ATC 5 — OV de tensão e corrente, torque integrado e *word-bits* de operação da TW32 para: (a) fase A do relé do terminal local, (b) fase A do relé do terminal remoto da LT, (c) fase B do relé do terminal local e (d) fase B do relé do terminal remoto.

De acordo com a Seção 4.3.3, para curtos-circuitos externos à LT, as OV's de tensão e corrente que incidem no terminal da LT à frente da falta possuem a mesma polaridade, o que é demonstrado na Figura 6.10, para o relé local. O curto-circuito simulado é aplicado à 0,5 p.u. da Barra *FL* do sistema teste e, dessa forma, caracteriza-se como evento reverso ao relé local e direto ao relé remoto, conforme evidenciado na figura. Assim, tão logo as primeiras OV's são detectadas pelo relé do terminal local, de acordo com o princípio de operação implementado no T400L, integra-se negativamente o torque de operação da proteção. Consequentemente, a TW32 restringe com segurança a operação da função, pois não terá a *word-bit* de operação sensibilizada e não enviará o sinal permissivo de atuação para o relé do terminal oposto. Assim, mesmo que o relé remoto seja sensibilizado e envie o disparo permissivo, a TW32 mantém a decisão por não atuar.

Na Figura 6.11, apresentam-se os torques de operação e restrição, os torques integrados e as *word-bits* de operação da TD32 para ambos os relés dos terminais da LT. A margem entre ambos os torques de restrição e o torque de operação, para o relé do terminal local, garantem à TD32 segurança na restrição da operação. Ainda, o reforço inicial, além de contribuir com o aumento da restrição, margem de segurança entre os torques integrados de operação e de restrição para defeitos à frente, acelera a declaração de direcionalidade do defeito para o relé local e, também, para o relé remoto. Percebe-se que, mesmo que detectada sobrecorrente pelo dispositivo de proteção do terminal local, a identificação de defeito na direção reversa da LT

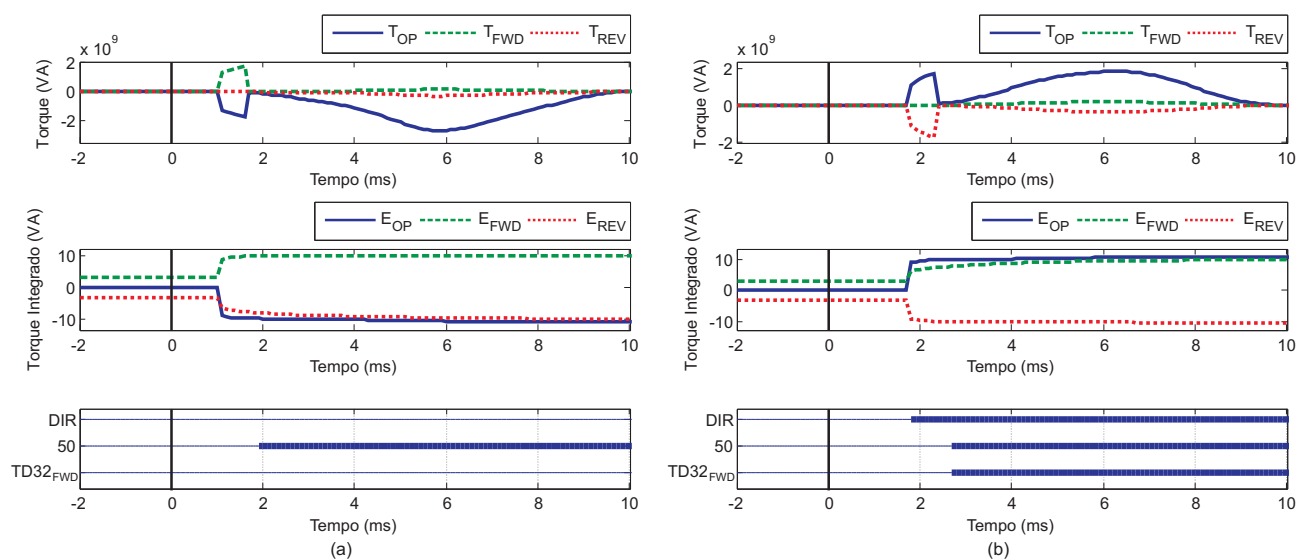


Figura 6.11. ATC 5 — Torques de operação e restrição, torques integrados e *word-bits* de operação da TD32 para: (a) relé do terminal local e (b) relé do terminal remoto da LT.

permite que o relé não dispare o sinal permissivo de atuação. Assim sendo, quando cruzadas as informações dos sinais permissivos dos dispositivos de proteção nos terminais da LT, a decisão por não atuar é garantida.

As tensões de operação e restrição, a diferença de tensão integrada e as *word-bits* de operação da TD21 para o caso em análise encontram-se ilustradas na Figura 6.12. A margem que separa as tensões de operação e de restrição da TD21 garante à proteção segurança no bloqueio da operação, conforme esperado. Esta margem é obtida a partir do aumento da tensão de restrição V_{RST} , decorrente da direção reversa da corrente observada durante o curto-circuito no terminal de referência. Conseqüentemente, mesmo que a *flag* referente à supervisão por sobrecorrente esteja habilitada, a ausência de qualquer integração da diferença de tensão garante que a *word-bit* para faltas dentro da zona de proteção permaneça desativada, garantindo o bloqueio da função conforme desejado.

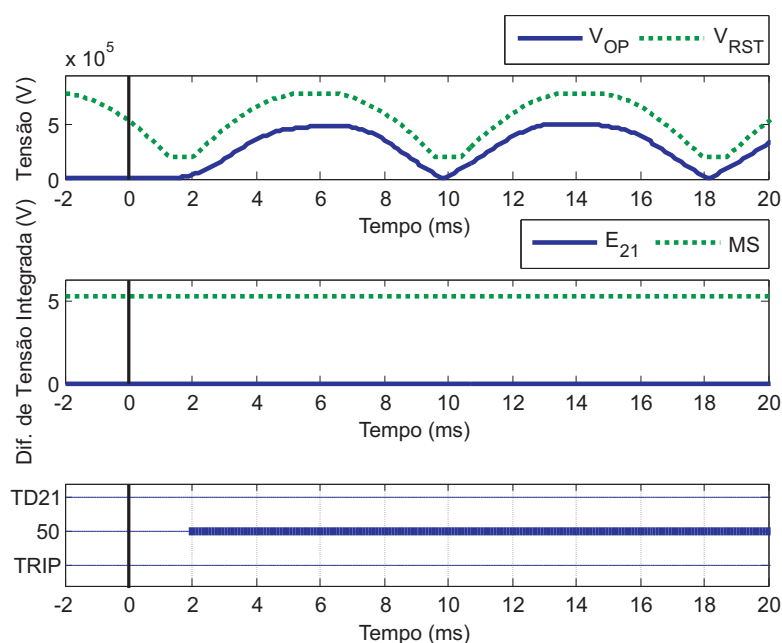


Figura 6.12. ATC 5 — Tensões de operação e restrição, diferença de tensão integrada e *word-bits* de operação da TD21 para o relé do terminal local da LT.

Na Figura 6.13, são apresentadas as OV's de corrente e as *word-bits* de operação da TW87 por fase. Para curtos-circuitos externos, de acordo com o apresentado na Seção 4.3.4, a onda viajante de corrente que entra em um terminal da LT sai, após o tempo de trânsito da linha, no terminal oposto com polaridade trocada, devido às polaridades dos TCs. Perante tal situação, a corrente de restrição tende a ser muito maior do que a de operação. Esta afirmativa pode ser verificada na Figura 6.13. A primeira OV de corrente identificada é a do terminal local.

Dessa forma, aplica-se uma janela de busca no terminal oposto ao da primeira onda, ou seja, no terminal remoto, a qual é centrada no tempo de trânsito da LT. Esta janela tem o objetivo de verificar se a OV que entrou em um terminal da LT saiu pelo terminal oposto, característica esta que é típica de faltas externas. Este comportamento pode ser verificado nos resultados ilustrados na Figura 6.13.

Para o caso simulado, obteve-se $i_{DIF} = 18$ A e $i_{RST} = 1239$ A, para a fase A, e $i_{DIF} = 23$ A, $i_{RST} = 1666$ A, para a fase B, e $m_{87} = 0$, para ambas as fases. Destaca-se que proporções desta magnitude entre as variáveis de operação e restrição da TW87 são típicas para faltas externas. Dessa forma, a TW87 tem a sua operação bloqueada com segurança, conforme desejado.

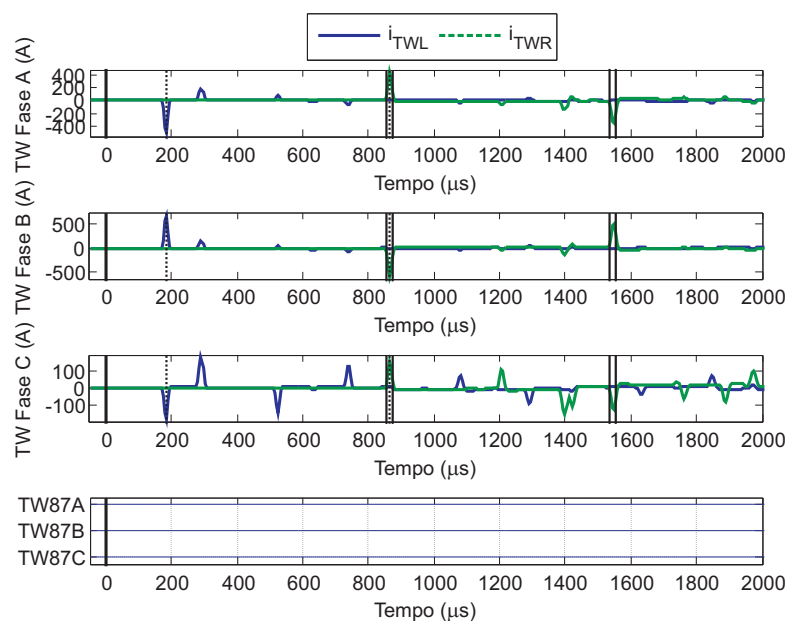


Figura 6.13. ATC 5 — OVs de corrente e *word-bits* de operação por fase da TW87.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma nova tendência dos sistemas de proteção de LTs: os algoritmos de proteção aplicados no domínio do tempo. De fato, a busca por maiores margens de estabilidade e o aumento da potência transferida em LTs têm impulsionado a introdução de sistemas de proteção rápidos no mercado, a exemplo do relé SEL-T400L, fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*.

Sabe-se que, devido as limitações impostas pelo processo de estimação fasorial, os sistemas de proteção tradicionais apresentam um atraso intrínseco no tempo de atuação. Dessa forma, os algoritmos aplicados no domínio do tempo surgem como uma possibilidade para o aumento da potência transferida, mantendo-se margens de estabilidade seguras do SEE.

As funções de proteção no domínio do tempo disponíveis no relé SEL-T400L são baseados no princípio das OV's e no princípio da superposição, a partir do qual são obtidas as grandezas incrementais. Dentre os algoritmos apresentados, dois deles consistem em elementos direcionais de potência (TD32 e TW32), outro em um novo algoritmo de proteção de distância (TD21) e, por fim, em uma nova abordagem para proteção diferencial de LTs utilizando os fundamentos de propagação de OV's em LTs (TW87).

Percebe-se, da literatura, que poucas são as referências que discorrem sobre a parametrização, o princípio de funcionamento e a implementação dessas funções. Assim sendo, este trabalho surge com o intuito de auxiliar os engenheiros eletricitistas da área de proteção quanto às novas funções de proteção aplicadas no domínio do tempo pelo T400L.

No Capítulo 4, apresentaram-se os princípios de operação e a implementação numérica de todas as funções de proteção do T400L. Percebe-se que, no desenvolvimento destes algoritmos, o requisito de atuações seguras e confiáveis foi priorizado, de forma a manter a velocidade apenas em situações nas quais não existe dúvida quanto à existência de um curto-circuito na LT protegida. Ainda, embora as funções do T400L se caracterizem como funções rápidas, baixos tempos

de atuação só são alcançados quando as funções se encontram corretamente ajustadas. Dessa forma, no Capítulo 5, foram apresentados métodos de parametrização dos ajustes de campo das proteções, ou seja, aqueles que dependem dos dados do SEE monitorado. Por fim, no Capítulo 6, resultados obtidos a partir de simulações computacionais foram analisados, demonstrando algumas características operacionais do T400L em estudo. No total, foram avaliados 5 cenários com diferentes configurações de um SEE composto por três linhas adjacentes e dois circuitos equivalentes de Thévenin.

As simulações transitórias de curto-circuito foram selecionadas de forma a abranger cenários de falta ilustrativos no que diz respeito à operação do T400L. Em resumo, foram variadas: resistência de falta, SIR nos terminais da LT, ângulo de incidência de falta e localização da falta. Dos resultados obtidos, percebe-se que as funções restringiram corretamente a operação para faltas externas à zona de proteção, para a TD21, e à linha de transmissão para as funções TD32, TW32 e TW87. Ainda, para os curtos-circuitos internos, as funções também funcionaram corretamente, atuando de forma segura e confiável, e apresentando variações nos tempos de operação, conforme esperado.

Para resistências mais elevadas, verificou-se que a função TD21 é a mais afetada, pois variou de forma mais significativa o seu tempo de atuação. Quanto ao ângulo de incidência de falta, as funções TW32 e TW87 não atuaram para θ próximos de zero, o que já era esperado, uma vez que OV's não são lançadas na LT nestes casos. Ainda, observou-se que a TD32 e a TD21, para baixos valores de ângulos de incidência, tiveram seus tempos de atuação retardados, pois, para estes casos, observam-se baixas variações das grandezas incrementais de tensão nos primeiros instantes de falta, resultando em uma variação mais lenta dos elementos de operação dessas funções. Já em termos de localização e tipo da falta, as funções atuaram de acordo com o esperado, estando em conformidade com as análises divulgadas pelo próprio fabricante do T400L.

Dessa forma, diante do apresentado neste trabalho, pode-se concluir que as funções de proteção disponíveis no T400L são robustas, rápidas, seguras e confiáveis, sendo capazes de prover *trips* da ordem de milissegundos. Porém, deve-se ressaltar que tal desempenho é verificado apenas para situações mais críticas, quando de fato as características dos sinais monitorados deixam evidente a condição de falta na LT. Realmente, o fabricante destaca que a intenção é

atuar rápido para curtos adversos, os quais são mais preocupantes em termos de estabilidade do SEE, mantendo a segurança do esquema de proteção para situações menos adversas. Por isso, o fabricante do T400L recomenda o uso de um relé parceiro, baseado nas funções tradicionais, a ser aplicado em paralelo com o T400L. Assim, garante-se segurança e confiabilidade para situações de faltas menos críticas, e velocidade para os curtos mais preocupantes para a rede elétrica.

Com o intuito de dar prosseguimento aos estudos realizados neste trabalho, são propostas as seguintes atividades futuras:

- Avaliar o comportamento das funções de proteção estudadas para LTs com compensação série e shunt;
- Avaliar o comportamento das funções perante a influência dos transitórios impostos pelos transformadores para instrumentos;
- Avaliar o comportamento das funções de proteção para cenários de faltas evolutivas e oscilações de potência nos sistemas elétricos de potência;
- Avaliar o comportamento das funções de proteção quando aplicadas em LTs com múltiplos terminais e em sistemas de transmissão com LTs em paralelo;
- Avaliar o comportamento das funções de proteção quando aplicadas a sistemas de transmissão não-homogêneos;
- Comparar o desempenho das funções do T400L com outras funções tradicionais utilizadas por relés disponíveis no mercado;
- Definir metodologia para obtenção dos ajustes de fábrica do T400L;
- Validar as implementações realizadas utilizando um relé SEL-T400L real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. M. *Power System Protection (IEEE Press Series on Power Engineering)*. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 11.
- BEWLEY, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, 1931. Citado na página 20.
- CENTER, L. E. *Alternative Transients Program (ATP): Rule Book*. [S.l.]: EMTP, 1992. Citado na página 66.
- CHAMIA, M.; LIBERMAN, S. Ultra high speed relay for ehv/uhv transmission lines – development, design and application. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, 1978. Citado na página 5.
- CROSSLEY, P. A.; MCLAREN, P. G. Distance protection based on traveling waves. *IEEE Power Engineering Review*, IEEE, PER-3, 1983. Citado na página 7.
- DOMMEL, H. W.; MICHELS, J. M. High speed relaying using traveling wave transient analysis. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, IEEE, New York, USA, A78, Feb. 1978. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.
- EASTVEDT, R. The need for ultra-fast fault clearing. In: *Third Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 1976. Citado na página 2.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Série Estudos de Demanda - Nota Técnica DEA 24/16: Projeção da Demanda de Energia Elétrica 2016-2025*. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Estudos_27.aspx>. Citado na página 1.
- ENGLER, F.; LANZ, O. E.; HANGGLI, M.; BACCHINI, G. Transient signals and their processing in an ultra high-speed directional relay for ehv/uhv transmission line protection. *IEEE Power Engineering Review*, IEEE, PER-5, 1985. Citado na página 6.
- FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods. In: *2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 12.
- FINNEY, D.; ZHANG, Z.; CARDENAS, J. Ultra fast distance protection. In: *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 8.
- GLOVER, J. D.; OVERBYE, T.; SARMA, M. S. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2011. Citado 7 vezes nas páginas 2, 15, 16, 46, 56, 70, and 78.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 1991. Citado na página 12.

IEEE Power System Relaying Committee. Ieee guide for protective relay applications to transmission lines. *IEEE Std C37.113-1999*, p. 1–113, Feb 2000. Citado 2 vezes nas páginas 69 and 70.

IRWIN, J. D.; NELMS, R. M. *Basic Engineering Circuit Analysis*. 11. ed. [S.l.]: Wiley, 2015. Citado na página 12.

JOHNS, A. New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of e.h.v. transmission lines. *IEE Proceedings C Generation Transmission and Distribution*, The Institution of Electrical Engineers, v. 127, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.

KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M.; TAYLOR, D. Practical setting considerations for protective relays that use incremental quantities and traveling waves. In: *43rd Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 20 vezes nas páginas vii, 9, 36, 37, 38, 39, 51, 52, 62, 65, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 79, and 88.

KASZTENNY, B.; VOLOH, I.; UDREN, E. A. Rebirth of the phase comparison line protection principle. In: *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2006*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 60 pp.–. Citado na página 8.

LOPES, F. V. *Localização de Falhas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014b. Citado 6 vezes nas páginas iii, 11, 14, 19, 20, and 21.

LOPES, F. V.; KUSEL, B. F.; SILVA, K. M. Traveling wave-based fault location on half-wavelength transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 1, p. 248–253, Jan 2016. ISSN 1548-0992. Citado na página 15.

LOPES, F. V.; SILVA, K. M.; RIBEIRO, J. P. G.; BAINY, R. G. Avaliação da influência dos tpcs sobre o desempenho de funções de proteção baseadas no domínio do tempo. In: *XIII Seminário Técnico de Proteção e Controle*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 67.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 11.2: Avaliação de desempenho dos sistemas de proteção*. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado na página 2.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações*. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Citado na página 2.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Dados Relevantes de 2014 - Extensão de Linhas de Transmissão*. [S.l.], 2016. Citado na página 1.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 2009. Citado 2 vezes nas páginas 23 and 77.

RIBEIRO, J. P. G. *Estudo e Implementação de Funções de Proteção no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L*. 120 f. Dissertação (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) — UNB: Universidade de Brasília, Brasília, DF, mai. 2017. Nenhuma citação no texto.

- RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V.; JUNIOR, E. L. Influência da componente cc de decaimento exponencial sobre o desempenho de elementos direcionais aplicados no domínio do tempo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (VI SBSE). Natal-RN, Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 34 and 88.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. 1. ed. [S.l.]: Springer-Verlag London, 2010. (Power Systems). Citado na página 12.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: *41st Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 8 vezes nas páginas 2, 8, 13, 14, 30, 31, 32, and 33.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: *42nd Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 14 vezes nas páginas 3, 9, 14, 24, 33, 40, 41, 45, 46, 49, 50, 54, 59, and 67.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; MYNAM M.V.AND GUZMÁN, A.; FISCHER, N.; SKENDZIC, V. Defining and measuring the performance of line protective relays. In: *43rd Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 75.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *40th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 5 vezes nas páginas iii, 16, 17, 18, and 24.
- SCHWEITZER, E. O.; HOU, D. *Filtering for Protective Relays*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 1993. Citado na página 3.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *SEL-T400L Data Sheet*. Pullman-WA, USA, 2016. Citado 5 vezes nas páginas iv, 9, 43, 47, and 62.
- SLUIS, L. van der. *Transients in Power Systems*. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 2001. Citado na página 16.
- TAKAGI, T.; BARBAR, J.; KATSUHIKO, U.; SAKAGUCHI, T. Fault protection based on traveling wave theory. part i: Theory. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, IEEE, Paper A77, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 7.
- TAKAGI, T.; YAMAKOSI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T.; MASUI, M. Digital differential relaying system for transmission line primary protection using traveling wave theory — its theory and field experience. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, IEEE, Paper A79, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 7.
- TLEIS, N. D. *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. [S.l.]: Elsevier, 2008. Citado na página 1.
- VITINS, M. A fundamental concept for high speed relaying. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 5 and 6.
- ZANETTA Jr., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Edusp, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 21.

ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*; 2. ed. Berlin, Germany: Siemens, AG, 2006. Citado na página 75.