

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO APLICADAS NO DOMÍNIO DO  
TEMPO DISPONÍVEIS NO RELÉ SEL-T400L**

**JOÃO PAULO GOMES RIBEIRO**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO E AVALIAÇÃO DE FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO APLICADAS NO DOMÍNIO DO  
TEMPO DISPONÍVEIS NO RELÉ SEL-T400L

JOÃO PAULO GOMES RIBEIRO

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

APROVADA POR:

FELIPE VIGOLVINO LOPES, Dr., ENE/UnB  
(Presidente da Comissão/Orientador)

FERNANDO CARDOSO MELO, Dr., ENE/UnB  
(Examinador Interno)

NÚBIA DANTAS BRITO, Dra., UFCG  
(Examinadora Externa)

Brasília/DF, 02 de Dezembro de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

RIBEIRO, JOÃO PAULO GOMES

Estudo e Avaliação das Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L. [Distrito Federal] 2019.

xvi, 136p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado, 2019).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- |                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Faltas em Linhas de Transmissão | 2. Proteção no Domínio do Tempo |
| 3. Ondas Viajantes                 | 4. Grandezas Incrementais       |
| 5. T400L                           | 6. Funções de Proteção Rápidas  |
| 7. Transitórios Eletromagnéticos   |                                 |

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RIBEIRO, J. P. G. (2019). Estudo e Avaliação das Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-729/2019, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Paulo Gomes Ribeiro

TÍTULO: Estudo e Avaliação das Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L.

GRAU: Mestre ANO: 2019

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



João Paulo Gomes Ribeiro

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Eng. Elétrica (ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

*À Nossa Senhora de Fátima, DEDICO.*



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus e à Nossa Senhora de Fátima, pelo acolhimento fraterno, força nos momentos de dificuldade e pela saúde que me foi dada, sem a qual não poderia ter chegado até aqui.

À minha família, de modo especial aos meus pais, Adão Paulo e Antonia, e ao meu irmão, João Victor, os quais constituem a base da minha vida. Com certeza, quando a base é forte, os obstáculos são enfrentados de forma mais amena.

À minha namorada, Jéssyca, pela grande companheira que é, por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre trazendo consigo a palavra de conforto, a esperança, a confiança e o carinho como características marcantes.

Ao meu orientador, Professor Felipe Lopes, pela confiança em mim depositada e pela orientação prestada, sem a qual não teria sido possível a execução do presente trabalho. Além de orientador, tornou-se um amigo, contribuindo para o grande crescimento pessoal e profissional que obtive na jornada da pesquisa.

Aos meus companheiros de LAPSE, pelos grandes momentos vividos e soluções encontradas para os desafios enfrentados ao longo dessa jornada. Sem dúvida, estar cercado por grandes pessoas tornou essa etapa da vida mais prazerosa.

A todos os professores com os quais tive a oportunidade de crescer e aprender, tanto como pessoa quanto como profissional. Trata-se de uma profissão grandiosa, a qual aprendi a amar e a respeitar.

À Universidade de Brasília, pela formação profissional e social de excelência.

À CAPES, pelo apoio financeiro prestado durante a presente pesquisa.

## RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, uma nova tendência do mercado de proteção de linhas de transmissão: as funções no domínio do tempo, disponíveis no primeiro relé microprocessado do cenário mundial a integrar unicamente funções dessa natureza — o relé SEL-T400L, de propriedade intelectual da *Schweitzer Engineering Laboratories*. Fundamentadas na teoria de ondas viajantes e das grandezas incrementais, dividem-se em quatro funções, a saber: duas 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 de ondas viajantes, TW87. Os conceitos associados à operação, desempenho e parametrização desse equipamento são relativamente novos e têm despertado o interesse de concessionárias mundo afora. Portanto, este trabalho visa elucidar as principais vantagens e limitações quanto ao emprego do relé SEL-T400L na proteção de linhas de transmissão. Para tanto, obtém-se o desempenho desse perante casos reais de faltas em uma linha de transmissão componente do Sistema Interligado Nacional bem como a partir de redes elétricas modeladas em *Alternative Transients Program*, para fins de simulações em massa. Dos resultados, constata-se que as funções de proteção aplicadas no domínio do tempo são confiáveis, rápidas e seguras, sendo capazes de prover tempos de atuação da ordem de  $1/4$  de ciclo da componente de frequência fundamental e redução média no tempo de operação associado às funções de proteção tradicionais da ordem de 17 ms.

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

## ABSTRACT

A new trend in the transmission line protection market is presented in this work: the time domain protection, available in the first relay in the world which integrates only this kind of functions — the SEL-T400L relay, manufactured by *Schweitzer Engineering Laboratories*. Based on the traveling waves theory and incremental quantities, they are divided into four functions, namely: 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. The concepts related to the relay operation, performance and settings procedures are relatively new and have attracted the interest of utilities worldwide. Consequently, this work aims to elucidate the major benefits and limitations related to SEL-T400L application in transmission lines' protection. Therefore, the relay performance is obtained considering actual fault cases related to a transmission line belonging the Brazilian interconnected transmission network as well as electrical power systems modeled in *Alternative Transients Program (ATP)*, from which massive simulations are carried out. From the obtained results, one can conclude the time domain protection functions are dependable, secure and fast, sending the line trip command in times of the order of a quarter of the fundamental cycle and being capable of reducing the operation time in about 17 ms, when compared to the traditional protection functions.

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

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iv
<b>Lista de Tabelas</b>	ix
<b>Lista de Símbolos</b>	x
<b>Glossário</b>	xvii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Motivação do Trabalho . . . . .	4
1.3 Objetivos do Trabalho . . . . .	5
1.4 Contribuições do Trabalho . . . . .	5
1.5 Publicações . . . . .	5
1.6 Organização do Texto . . . . .	7
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</b>	9
<b>Capítulo 3 – Processamento de Sinais e a Estrutura Básica do T400L</b>	17
3.1 Faltas em Sistemas de Transmissão . . . . .	17
3.2 Processamento de Sinais . . . . .	18
3.2.1 Grandezas Incrementais . . . . .	20
3.2.2 Extração de Ondas Viajantes . . . . .	22
3.3 Estrutura Básica . . . . .	26
3.4 Funções Auxiliares . . . . .	30
3.4.1 <i>Arming Logic</i> . . . . .	30
3.4.2 <i>Starting Logic</i> . . . . .	30
3.4.3 <i>Traveling Wave (TW) Disturbance Detector</i> . . . . .	32
3.4.4 Supervisão por Sobrecorrente . . . . .	32

<b>Capítulo 4 – As Funções de Proteção do T400L</b>	<b>35</b>
4.1 <i>Time-Domain</i> 32 — TD32 . . . . .	35
4.1.1 Princípio de Operação . . . . .	35
4.1.2 Diagrama Lógico da TD32 . . . . .	39
4.2 <i>Time-Domain</i> 21 — TD21 . . . . .	40
4.2.1 Princípio de Operação . . . . .	41
4.2.2 Diagrama Lógico da TD21 . . . . .	42
4.3 <i>Traveling Wave</i> 87 — TW87 . . . . .	44
4.3.1 Princípio de Operação . . . . .	45
4.3.2 Diagrama Lógico da TW87 . . . . .	47
4.4 <i>Traveling Wave</i> 32 — TW32 . . . . .	54
4.4.1 Princípio de Operação . . . . .	54
4.4.2 Diagrama Lógico da TW32 . . . . .	56
4.4.3 Esquema de Teleproteção <i>POTT</i> . . . . .	58
<b>Capítulo 5 – Ajustes, Metodologia de Testes e Sistemas Analisados</b>	<b>60</b>
5.1 Sistemas de Potência Avaliados nos Testes . . . . .	60
5.1.1 Sistema Real 1 (SR1) . . . . .	60
5.1.2 Sistema Real 2 (SR2) . . . . .	62
5.1.3 Sistema Simulado 1 (SS1) . . . . .	63
5.2 Metodologia de Teste . . . . .	65
5.2.1 Metodologia de teste aplicada à mala de teste . . . . .	65
5.2.2 Metodologia de teste aplicada à funcionalidade de <i>playback</i> do T400L . . . . .	66
5.3 Ajustes das Funções de Proteção do T400L . . . . .	68
5.4 Ajustes Utilizados . . . . .	68
<b>Capítulo 6 – Análise de Resultados</b>	<b>71</b>
6.1 Resultados para o SR1 . . . . .	71
6.1.1 Casos reais de falta . . . . .	72
6.1.1.1 Análise Pontual de Desempenho — Caso R1 . . . . .	74
6.1.1.2 Análise Pontual de Desempenho — Caso R8 . . . . .	75
6.1.1.3 Síntese dos Resultados . . . . .	76
6.1.2 Casos simulados de falta . . . . .	77
6.1.2.1 Análise Pontual de Desempenho — Caso S3 . . . . .	79
6.1.2.2 Análise Pontual de Desempenho — Caso S5 . . . . .	82
6.1.2.3 Síntese dos Resultados . . . . .	84
6.2 Resultados para o SR2 . . . . .	85

6.2.1	Análise Pontual de Desempenho — Falta Interna . . . . .	86
6.2.2	Análise Pontual de Desempenho — Energização de Linha Adjacente . . .	88
6.3	Resultados para o SS1 . . . . .	90
6.3.1	A Influência do Ângulo de Incidência de Falta . . . . .	90
6.3.2	A Influência da Resistência de Falta . . . . .	92
6.3.3	A Influência dos TPCs . . . . .	95
6.3.4	A Influência dos TCs . . . . .	97
6.3.5	A Necessidade do Relé Companheiro . . . . .	99
6.3.6	O Desempenho do T400L para as Simulações em Massa . . . . .	101
<b>Capítulo 7 – Conclusões</b>		<b>109</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>114</b>
<b>Apêndice A – Derivação da Corrente Réplica Incremental e Considerações para Sistemas Trifásicos</b>		<b>119</b>
A.1	Considerações para Sistemas Monofásicos . . . . .	119
A.2	Considerações para Sistemas Trifásicos: os Loops de Falta . . . . .	121
<b>Apêndice B – Procedimento de Ajuste do Relé SEL-T400L</b>		<b>126</b>
B.1	Parametrização dos Ajustes Gerais . . . . .	126
B.1.1	Procedimento referente à XC . . . . .	127
B.1.2	Procedimento referente à EXTSC . . . . .	127
B.2	Parametrização da TD32 . . . . .	128
B.3	Parametrização da TD21 . . . . .	129
B.4	Parametrização da TW87 . . . . .	131
B.4.1	Procedimento referente à TWLPT . . . . .	131
B.4.2	Procedimento referente à supervisão por sobrecorrente . . . . .	133
B.5	Parametrização do <i>POTT</i> . . . . .	134
B.5.1	Parametrização para linhas sem compensação série interna . . . . .	135
B.5.2	Parametrização para linhas com compensação série interna . . . . .	135

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Diagrama Simplificado de Processamento de Sinais do Relé SEL-T400L. . . . .	19
3.2	Sinais de corrente para uma falta com ângulo de incidência nulo: (a) Corrente de carregamento; (b) Corrente Monitorada; (c) Grandeza incremental de corrente obtida para diferentes valores de $p$ . . . . .	21
3.3	Lógica de derivação das grandezas incrementais utilizadas no T400L. . . . .	22
3.4	Filtro DS: (a) Diagrama de blocos; (b) Janela de dados. . . . .	23
3.5	Resposta do filtro DS para diferentes sinais de entrada: (a) Degrau; (b) Rampa. . . . .	24
3.6	Aplicação do filtro DS em um registro simulado de falta. . . . .	25
3.7	Influência de $T_{DS}$ no desempenho do filtro DS. . . . .	25
3.8	Resposta em frequência do filtro DS considerando diferentes valores de $T_{DS}$ . . . . .	26
3.9	Visão geral das funções contidas no T400L. . . . .	27
3.10	Princípio de operação da <i>Starting Logic</i> . . . . .	31
3.11	Princípio de operação da supervisão por sobrecorrente do T400L. . . . .	33
3.12	Lógica de supervisão por sobrecorrente simplificada referente ao <i>loop</i> AT. . . . .	34
4.1	Circuito puro de falta e as relações entre tensão e corrente incrementais para: (a) Falta direta; (b) Falta Reversa. . . . .	36
4.2	Polaridade entre tensão e corrente réplica incrementais observada para faltas: (a) diretas; (b) reversas. . . . .	37

4.3	Trajétórias descritas no plano de operação incremental quando $T_{OP}$ é obtido a partir do produto entre o negativo da tensão incremental e: (a) corrente incremental e réplica incremental para faltas diretas; (b) corrente incremental e réplica incremental para faltas reversas. . . . .	38
4.4	Diagrama lógico simplificado da TD32 para o <i>loop</i> de falta AT. . . . .	39
4.5	Princípio de operação da TD21 para faltas: (a) internas e (b) externas à zona de proteção. . . . .	42
4.6	Tensão de restrição da TD21: (a) diagrama de blocos para o cálculo de $V_{21RST}$ ; (b) tensão obtida. . . . .	43
4.7	Lógica de operação simplificada da TD21 para o <i>loop</i> de falta AT. . . . .	44
4.8	Princípio de operação da TW87 para falta: (a) externa; (b) interna. . . . .	46
4.9	Definindo os instantes de chegada e saída das OV's de corrente na LT monitorada.	48
4.10	Lógica da TW87 referente ao processamento da localização de faltas. . . . .	49
4.11	A relação entre a tensão de pré-falta e as OV's de corrente lançadas no ponto de defeito para falta franca na linha: (a) protegida; (b) paralela. . . . .	50
4.12	Obtenção da tensão de polarização. . . . .	50
4.13	Lógica da TW87 referente à magnitude das OV's incidentes. . . . .	51
4.14	Lógica de restrição da TW87. . . . .	52
4.15	Lógica de operação simplificada da TW87. . . . .	53
4.16	Princípio de operação da TW32 para: (a) falta externa; (b) falta interna. . . . .	55
4.17	Lógica de operação simplificada da TW32 para a fase A. . . . .	57
4.18	Lógica simplificada de <i>POTT</i> do T400L. . . . .	58
5.1	Sistema Real 1: circuito 3 de transmissão entre a SE Jauru e a SE Vilhena. . . . .	61
5.2	Sistema Real 2: circuito 2 de transmissão entre as SE Colinas e a SE Imperatriz.	62
5.3	Sistema Simulado 1. . . . .	64
5.4	Procedimento de teste laboratorial utilizando mala de teste. . . . .	66



5.5	Procedimento de teste laboratorial utilizando a funcionalidade de <i>playback</i> do T400L para: (a) casos pontuais; (b) simulações em massa. . . . .	67
6.1	Tensões, correntes e <i>word-bits</i> de atuação do T400L para o caso real R1. . . . .	75
6.2	Tensões, correntes e <i>word-bits</i> de atuação do T400L para o caso real R8. . . . .	76
6.3	Grandezas incrementais de corrente e tensão e as <i>word-bits</i> de atuação referentes às funções TD embarcadas no T400L para o caso simulado S3. . . . .	79
6.4	Ondas viajantes de tensão e corrente e as <i>word-bits</i> de atuação referentes às funções TW embarcadas no T400L para o caso simulado S3. . . . .	81
6.5	Grandezas incrementais de corrente e tensão e as <i>word-bits</i> de atuação referentes às funções TD embarcadas no T400L para o caso simulado S5. . . . .	82
6.6	Ondas viajantes de tensão e corrente e as <i>word-bits</i> de atuação referentes às funções TW embarcadas no T400L para o caso simulado S5. . . . .	83
6.7	Torques e tensões de operação e de restrição relacionados às funções TD para uma falta interna aplicada a 20% da SE COL. . . . .	86
6.8	Ondas viajantes de corrente e tensão relacionadas às funções TW para uma falta interna aplicada a 20% da SE COL. . . . .	88
6.9	Tensões, correntes e <i>word-bits</i> de atuação referentes ao T400L para energização das linhas que interligam as SE IPZ e SE PD. . . . .	89
6.10	Análise pontual de desempenho das funções TD para ângulos de incidência de falta $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ . . . . .	91
6.11	Análise pontual de desempenho das funções TW para ângulos de incidência de falta $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ . . . . .	92
6.12	Análise pontual de desempenho das funções TD para resistências de falta $R_F = 0 \Omega$ e $R_F = 50 \Omega$ . . . . .	93
6.13	Análise pontual de desempenho das funções TW para resistências de falta $R_F = 0 \Omega$ e $R_F = 50 \Omega$ . . . . .	94
6.14	Análise pontual de desempenho das funções TD perante a influência dos TPCs. . . . .	95

---

6.15	Análise pontual de desempenho das funções TW perante a influência dos TPCs.	96
6.16	Análise pontual de desempenho das funções TD perante a influência dos TCs.	98
6.17	Análise pontual de desempenho das funções TW perante a influência dos TCs.	99
6.18	Demonstração da necessidade do relé companheiro.	100
6.19	Desempenho da TD32: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.	102
6.20	Desempenho da TD21: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.	103
6.21	Desempenho da TW32: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.	104
6.22	Desempenho da TW87: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.	105
6.23	Desempenho geral do T400L: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.	106
6.24	Comparação entre os tempos de atuação das funções de proteção embarcadas no T400L.	108
A.1	Circuito puro de falta e as relações entre tensão e corrente incrementais.	119
A.2	Correntes incremental e réplica incremental.	121
A.3	Componentes de sequência para: (a) Falta AT e (b) Falta BC.	122
B.1	Procedimento de parametrização referente ao ajuste XC.	127
B.2	Procedimento de parametrização referente ao ajuste EXTSC.	128
B.3	Procedimento de energização da linha para determinar o ajuste TWLPT.	132
B.4	Procedimento de refinamento para determinar o TWLPT real.	132

---

B.5	Configuração da rede elétrica para ajuste dos elementos de sobrecorrente. . . . .	133
B.6	<i>Pickup</i> efetivo para sistemas compensados. . . . .	136

## LISTA DE TABELAS

5.1	Parâmetros elétricos referentes à linha C3 do sistema SR1. . . . .	62
5.2	Parâmetros elétricos referentes à linha C2 do sistema SR2. . . . .	63
5.3	Ajustes associados às funções de proteção do T400L. . . . .	69
5.4	Ajustes obtidos para cada um dos sistemas teste considerados. . . . .	70
6.1	Avaliação das funções PH21, PH87, TD21 e TD32 considerando casos reais de falta. . . . .	73
6.2	Tempo de Operação do T400L considerando habilitados os esquemas de teleproteção <i>POTT</i> e <i>DTT</i> e a TD21 em operação <i>stand alone</i> . . . . .	74
6.3	Tempo de Operação das funções TD21, TD32, TW32 e TW87 considerando casos simulados de falta. . . . .	78
A.1	<i>Loops</i> de tensões e correntes incrementais no domínio do tempo. . . . .	124

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_s$	Frequência de amostragem.
$\Delta s$	Grandeza incremental instantânea para a variável $s$ .
$p$	Número de ciclos que determina a duração da grandeza incremental.
$T$	Período da componente de frequência fundamental.
$T_{DS}$	Tempo de duração da janela do filtro DS.
$G$	Ganho do filtro DS.
$N_{DS}$	Número de amostras contidas em uma da janela do filtro DS.
$v_{TW}$	Onda viajante de tensão por fase.
$i_{TW}$	Onda viajante de tensão por fase.
$v$	Tensão instantânea por fase.
$i$	Corrente instantânea por fase.
$\Delta v$	Tensão incremental de <i>loop</i> .
$\Delta i_Z$	Corrente incremental de <i>loop</i> .
$V$	Fasor de Tensão por fase.
$\Delta v_{START}$	Tensão incremental associada à lógica de detecção de distúrbios baseada em grandezas incrementais.
$TWDD$	<i>Word-bit</i> associada à lógica de detecção de distúrbios baseada em ondas viajantes <sup>1</sup> .
$\Delta v_{AT}$	Tensão incremental associada ao <i>loop</i> de falta AT.

---

<sup>1</sup> *Word-bit* — palavra binária para indicar o estado das variáveis internas do relé microprocessado.

$\Delta i_{ZAT}$	Corrente réplica incremental associada ao <i>loop</i> de falta AT.
$START$	<i>Word-bit</i> que indica que a <i>Starting Logic</i> foi satisfeita <sup>1</sup> .
$R_L$	Resistência de sequência positiva associada ao equivalente local da linha monitorada.
$L_L$	Indutância de sequência positiva associada ao equivalente local da linha monitorada.
$Z_L, Z_{1LOC}$	Impedância de sequência positiva associada ao equivalente local da linha monitorada.
$Z_R, Z_{1REM}$	Impedância de sequência positiva associada ao equivalente remoto da linha monitorada.
$T_{OP}$	Torque de operação da TD32.
$T_{FWD}$	Torque de restrição da TD32 para defeitos diretos.
$T_{REV}$	Torque de restrição da TD32 para defeitos reversos.
$TD32ZF$	Impedância de ajuste para defeitos diretos.
$TD32ZR$	Impedância de ajuste para defeitos reversos.
$AGFLT$	<i>Word-bit</i> que indica que o <i>loop</i> de falta AT satisfaz a <i>Starting Logic</i> <sup>1</sup> .
$ABFLT$	<i>Word-bit</i> que indica que o <i>loop</i> de falta AB satisfaz a <i>Starting Logic</i> <sup>1</sup> .
$CAFLT$	<i>Word-bit</i> que indica que o <i>loop</i> de falta CA satisfaz a <i>Starting Logic</i> <sup>1</sup> .
$TD32F$	<i>Word-bit</i> associada à TD32 indicando a presença de um distúrbio direto <sup>1</sup> .
$TD32R$	<i>Word-bit</i> associada à TD32 indicando a presença de um distúrbio reverso <sup>1</sup> .
$OCTP$	<i>Word-bit</i> que indica o estado da supervisão por sobrecorrente associado ao esquema de teleproteção <i>POTT</i> <sup>1</sup> .
$V_{PRE}$	Tensão de pré-falta calculada no ponto de alcance da proteção de distância.
$m_0$	Alcance da proteção de distância.
$i_Z$	Corrente réplica.
$V_{21OP}$	Tensão de operação da TD21.
$V_{21R}$	Variável auxiliar de restrição da TD21.

$V_{21RST}$	Tensão de restrição da TD21.
$TD21AG$	<i>Word-bit</i> que indica atuação da TD21 quanto ao <i>loop</i> de falta AT <sup>1</sup> .
$TD21G$	<i>Word-bit</i> que indica atuação da TD21 associada aos <i>loops</i> de falta monofásicos <sup>1</sup> .
$TD21P$	<i>Word-bit</i> que indica atuação da TD21 associada aos <i>loops</i> de falta bifásicos <sup>1</sup> .
$OC21AG$	<i>Word-bit</i> que indica o estado da supervisão por sobrecorrente associado ao <i>loop</i> de falta AT para a TD21 <sup>1</sup> .
$i_{TWL}$	Onda viajante de corrente para o terminal local da linha.
$i_{TWR}$	Onda viajante de corrente para o terminal remoto da linha.
$\tau$	Tempo de trânsito da linha.
$\Delta\tau$	Variação do tempo de trânsito da linha.
$i_{RTL}$	Corrente de restrição considerando que a OV de corrente entra pelo terminal local e sai pelo remoto.
$i_{RTR}$	Corrente de restrição considerando que a OV de corrente entra pelo terminal remoto e sai pelo local.
$i_{RT}$	Corrente de restrição.
$i_{OP}$	Corrente de operação.
$S$	Fator de restrição ou <i>slope</i> .
$NL_{FIRST}$	Amostra associada ao instante de chegada da primeira onda viajante de corrente no terminal local da linha.
$NR_{FIRST}$	Amostra associada ao instante de chegada da primeira onda viajante de corrente no terminal remoto da linha.
$NL_{EXIT}$	Amostra associada ao instante de saída da onda viajante de corrente no terminal local da linha.
$NR_{EXIT}$	Amostra associada ao instante de saída da onda viajante de corrente no terminal remoto da linha.
$IL$	Magnitude da primeira onda viajante detectada no terminal local da linha.

$IR$	Magnitude da primeira onda viajante detectada no terminal remoto da linha.
$IOP$	Grandeza de operação da função diferencial TW87.
$IRT$	Grandeza de restrição da função diferencial TW87.
$TW87FL$	Variável de localização de faltas da TW87.
$VPOL$	Tensão de polarização.
$IRTL$	Grandeza de restrição da TW87 considerando que a OV de corrente entra pelo terminal local e sai pelo remoto.
$IRTR$	Grandeza de restrição da TW87 considerando que a OV de corrente entra pelo terminal remoto e sai pelo local.
$TW87PKP$	<i>Word-bit</i> associada à TW87 indicando que o esquema diferencial foi sensibilizado para o distúrbio incidente <sup>1</sup> .
$TW87$	<i>Word-bit</i> associada à TW87 indicando a atuação do esquema diferencial <sup>1</sup> .
$OC87$	<i>Word-bit</i> que indica o estado da supervisão por sobrecorrente associado ao esquema diferencial de linha <sup>1</sup> .
$XC$	Reatância do banco de capacitores interno à linha.
$EXTSC$	Ajuste que indica a presença ou ausência de compensação série externa à linha.
$v_{ATW}$	Onda viajante de tensão para a fase A.
$i_{ATW}$	Onda viajante de corrente para a fase A.
$T_{INT}$	Tempo durante o qual integrador associado à TW32 é mantido ativo.
$T_{OUT}$	Tempo durante o qual integrador associado à TW32 é mantido bloqueado.
$i_{TWmin}$	Valor mínimo referente às OVs de corrente por fase.
$E_A, E_B, E_C$	Energia de operação para as fases A, B e C.
$E_{NOP}$	Energia de operação da função TW32.
$E_{NRT}$	Energia de restrição da função TW32.
$k_{FWD}$	Constante de restrição associada aos distúrbios diretos.
$k_{REV}$	Constante de restrição associada aos distúrbios reversos.



$TW32F$	<i>Word-bit</i> associada à TW32 indicando a presença de um distúrbio direto <sup>1</sup> .
$TW32R$	<i>Word-bit</i> associada à TW32 indicando a presença de um distúrbio reverso <sup>1</sup> .
$Z_0, Z_{L0}, Z_{LT0}$	Impedância de sequência zero da linha.
$Z_1, Z_{L1}, Z_{LT1}$	Impedância de sequência positiva da linha.
$R_0$	Resistência de sequência zero da linha.
$R_1$	Resistência de sequência positiva da linha.
$L_0$	Indutância de sequência zero da linha.
$L_1$	Indutância de sequência positiva da linha.
$Z_1, Z_{L1}, Z_{LT1}$	Impedância de sequência positiva da linha.
$Y_{L0}$	Admitância de sequência zero da linha.
$Y_{L1}$	Admitância de sequência positiva da linha.
$R_F$	Resistência de falta.
$d$	Local de aplicação da falta.
$\theta$	Ângulo de incidência de falta.
$\delta$	Ângulo de carregamento.
$TD21MP$	Alcance da TD21 para os <i>loops</i> de falta bifásicos.
$TD21MG$	Alcance da TD21 para os <i>loops</i> de falta monofásicos.
$TWLPT$	Ajuste referente ao tempo de propagação da linha.
$TWLPT_{approx}$	Tempo de trânsito da linha aproximado.
$TP50P$	Valor de <i>pickup</i> associado à supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta bifásicos da TW87.
$TP50G$	Valor de <i>pickup</i> associado à supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta monofásicos da TW87.
$TP67P$	Valor de <i>pickup</i> associado à supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta bifásicos da TD21 e do esquema <i>POTT</i> .

$TP67G$	Valor de <i>pickup</i> associado à supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta monofásicos da TD21 e do esquema <i>POTT</i> .
$Z_{S1}$	Menor impedância de sequência positiva associada ao equivalente local da linha protegida.
$\Delta I_A, \Delta I_B, \Delta I_C$	Fasores de corrente de falta incrementais referentes às fases A, B e C.
$\Delta I_{AT}$	Fasor de corrente incremental associado ao <i>loop</i> de falta AT.
$\Delta I_0$	Fasor de corrente de sequência zero incremental.
$\Delta I_{AB1}$	Fasor de corrente incremental associado ao <i>loop</i> de falta AB para a aplicação de uma falta bifásica.
$\Delta I_{AB2}$	Fasor de corrente incremental associado ao <i>loop</i> de falta AB para a aplicação de uma falta trifásica.
$I_{1C}$	Corrente capacitiva de sequência positiva da linha.
$V_{NOM}$	Tensão nominal de linha do sistema.
$I_{LOAD}$	Corrente de carga.
$TRPRM$	<i>Word-bit</i> que sinaliza a permissão para energização da bobina do disjuntor da linha <sup>1</sup> .
$\hat{I}_0$	Fasor da corrente de sequência zero.
$\hat{I}_1$	Fasor da corrente de sequência positiva.
$\hat{I}_2$	Fasor da corrente de sequência negativa.
$\hat{I}_A$	Fasor da corrente da Fase A.
$\hat{I}_B$	Fasor da corrente da Fase B.
$\hat{I}_C$	Fasor da corrente da Fase C.
$\hat{I}_{AT}$	Fasor da corrente de <i>loop</i> para uma falta fase-terra AT.
$\hat{I}_{ZAT}$	Fasor da corrente réplica de <i>loop</i> para uma falta fase-terra AT.
$\hat{I}_{BC}$	Fasor da corrente de <i>loop</i> para uma falta fase-fase BC.
$\hat{I}_{ZBC}$	Fasor da corrente réplica de <i>loop</i> para uma falta fase-fase BC.

---

$\widehat{V}_A$	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 <i>loop</i> 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.
$a$	Operador matemático complexo usado na transformação entre componentes de fase e de sequência.
$f_{IZ}$	Função para cálculo da corrente réplica.

## GLOSSÁRIO

ADC	Conversor Analógico-Digital
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
DS	<i>Differentiator-Smoother</i>
DTT	<i>Direct Transfer Trip</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema
OVs	Ondas Viajantes
POTT	<i>Permissive Overreaching Transfer Trip</i>
SE	Subestação
SEE	Sistemas de Energia Elétrica
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Source-to-Impedance Ratio</i>
SR1	Sistema Real 1
SR2	Sistema Real 2
SS1	Sistema Simulado 1
TC	Transformador de Corrente
TD	<i>Time-Domain</i>

---

TD32	<i>Time-Domain</i> 32
TD21	<i>Time-Domain</i> 21
TNA	<i>Transients Network Analyser</i>
TP	Transformador de Potencial
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TW	<i>Traveling-Wave</i>
TW32	<i>Traveling-Wave</i> 32
TW87	<i>Traveling-Wave</i> 87
T400L	Relé microprocessado baseado no domínio do tempo

### 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 até 2025, respectivamente (EPE, 2016). Como consequência da 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, continuidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Sabe-se que a maior parte do SIN é formada por linhas de transmissão (LTs), visto que a matriz energética brasileira é predominantemente composta por geração hidrelétrica 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 2017, o sistema de transmissão nacional já possuía mais de 141.000 km de extensão (ONS, 2019), distância essa suficiente para dar mais de três voltas ao planeta Terra.

Nos Sistemas de Energia Elétrica (SEE), entre 80% e 90% dos curtos-circuitos ocorrem nas LTs (Tleis, 2008). De fato, quão mais extensas as linhas, 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. Devido aos intensos níveis de curto-circuito observados e ao conseqüente desgaste provocado nos equipamentos elétricos, é notável a preocupação do setor elétrico em

rapidamente isolar o distúrbio e restabelecer o sistema. É neste contexto que se destacam os sistemas de proteção de linhas de transmissão, os quais são responsáveis por promover desligamentos seletivos, evitando blecautes de grandes proporções.

Com o intuito de regulamentar os sistemas de proteção empregados no SIN, garantir a segurança humana e reduzir os desgastes de equipamentos, o ONS, por meio de seus procedimentos de rede, impõe exigências quanto ao tempo máximo de eliminação de faltas (incluindo-se o tempo de abertura dos disjuntores das LTs): não deve exceder 100 ms, para defeitos sólidos e sem ocorrência de falha de disjuntor (ONS, 2017). Além disso, visando reduzir sobremaneira a quantidade de blecautes provocados por erros de equipamentos de proteção durante os desligamentos forçados, o ONS considera satisfatório o desempenho dos relés de proteção de linhas que atuam corretamente em índice superior a 95% das solicitações para as quais são submetidos (ONS, 2016a). Em decorrência das exigências supracitadas e também com o objetivo de aumentar as margens de estabilidade dos SEEs, a busca por funções de proteção rápidas, seguras e confiáveis tem sido intensificada ao longo dos últimos anos, motivando em âmbito mundial diversas pesquisas e desenvolvimento de produtos correlatos ao tema (GE MULTILIN L60, 2009; SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Sabe-se que os sistemas de proteção de LTs tradicionais baseiam-se na estimação de fasores fundamentais dos sinais de corrente e tensão nos terminais da linha monitorada. Embora seguros e largamente utilizados, tais sistemas possuem um atraso inerente ao procedimento de estimação fasorial, o qual está associado ao processo de janelamento de dados — delimitação de um conjunto de amostras consecutivas de um dado sinal cujo fasor será estimado (Phadke; Thorp, 2009). Durante a ocorrência de um curto-circuito, observa-se um período de tempo finito referente à transição dos fasores do regime de pré-falta para o de falta, o qual é diretamente proporcional ao tamanho da janela de dados utilizadas no processo de estimação fasorial.

Na prática, somente quando a janela de dados contiver amostras de um único regime operacional é que medições corretas dos fasores estimados serão obtidas (Coury *et al.*, 2007). Dependendo da severidade e da localização da falta, funções de proteção de distância podem operar durante o período de transição da janela de dados. Entretanto, sabendo-se que as funções de proteção tradicionais são ajustadas com base nos valores de tensões e correntes no regime permanente de falta, diz-se que o atraso inerente a essas funções é da ordem do tamanho da janela

de dados empregadas, as quais variam tipicamente entre meio a um ciclo e meio da componente de frequência fundamental (Schweitzer; Hou, 1993).

Como alternativa para acelerar as atuações das proteções, funções baseadas no domínio do tempo têm sido utilizadas, as quais processam as amostras instantâneas dos sinais de tensão e corrente monitorados, eliminando a necessidade de estimar fasores para tomada de decisões (Schweitzer *et al.*, 2014a). Ao final da década de 80, estudos da *Bonneville Power Administration* (BPA) demonstraram que a redução de um ciclo na duração de faltas em uma dada linha possibilitaria uma transferência adicional de potência da ordem de 250 MW, ou seja, 15 MW/ms (Eastvedt, 1976) quando da aplicação de elementos de proteção baseados no domínio do tempo.

Assumindo-se uma falta com uma dada severidade, quão maior a potência elétrica transferida no sistema com defeito, maior será a aceleração das máquinas elétricas de geração (Glover *et al.*, 2012), resultando em menores margens de estabilidade da rede elétrica. Neste contexto, devido à atuação rápida das funções de proteção no domínio do tempo, entende-se que essas são capazes de reduzir o tempo de aceleração das unidades geradoras e, conseqüentemente, possibilitam o aumento das margens de estabilidade das redes elétricas. Havendo a garantia de atuações rápidas, seguras e confiáveis, pode-se almejar um aumento da potência transferida em LTs existentes, sem a necessidade de implantação de novos sistemas de transmissão, reduzindo, assim, os investimentos decorrentes do aumento de demanda de energia elétrica constantemente observado nos SEEs (Anderson; Fouad, 2003).

Além do aumento das margens de estabilidade promovido aos sistemas elétricos, os dispositivos de proteção rápidos também possibilitam a melhoria nos indicadores de qualidade da energia bem como a redução do estresse eletromecânico provocado aos transformadores durante a ocorrência de faltas passantes (Abboud; Dolezilek, 2017). Portanto, isolar mais rapidamente a falta contribui para o aumento da vida útil desses equipamentos. Além disso, sabe-se que as plantas industriais modernas empregam diversos dispositivos eletrônicos, os quais são reconhecidamente sensíveis às variações na tensão que os alimentam (Felce *et al.*, 2004). Neste contexto, os afundamentos de tensão provocados por curtos-circuitos nos sistemas de transmissão constituem o principal distúrbio de qualidade de energia relacionado à operação das plantas industriais (Abboud; Dolezilek, 2017), afetando principalmente aquelas que utilizam processos contínuos de produção. Assim sendo, reduzir a duração desse fenômeno constitui-se



como a principal ação de melhoria promovida aos indicadores de qualidade da energia, fato esse diretamente relacionado ao tempo de eliminação dos defeitos observados nos sistemas de transmissão.

Do exposto, percebe-se que os ganhos promovidos por funções de proteção aplicadas no domínio do tempo são diversificados, o que tem motivado pesquisas no tema desde a década de 70. Entretanto, devido às limitações de *hardware* observadas à época, pouco evoluiu-se no assunto. Todavia, nos últimos anos, o avanço na eletrônica digital possibilitou o desenvolvimento de conversores A/D (Analógico-Digital) de alta resolução e de processadores de alto desempenho, permitindo o lançamento de relés microprocessados modernos capazes de processar as amostras instantâneas dos sinais monitorados com o objetivo de reduzir os atrasos nos tempos de detecção de faltas, a exemplo do relé SEL-T400L (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). As funções de proteção contidas nesse dispositivo são aplicadas no domínio do tempo com base na teoria de ondas viajantes (OVs) e de grandezas incrementais visando o desenvolvimento de elementos de proteção de distância (TD21), diferencial (TW87) e direcionais de potência (TD32 e TW32), com objetivo de proteger os mais diversos sistemas de transmissão.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A comercialização do T400L insere no mercado de proteção de LTs um dispositivo inovador com desempenho inédito em comparação a tecnologia até então existente. Todavia, os conceitos referentes à operação e parametrização desse equipamento são relativamente novos e têm despertado o interesse de concessionárias mundo afora. No Brasil, ainda são muitos os questionamentos a respeito da operação deste dispositivo frente casos reais de faltas associados ao SIN. Adicionalmente, na literatura, ainda não foram apresentados trabalhos que esclareçam o desempenho do relé SEL-T400L real para registros reais e simulados de falta do SIN, o que tem sido motivo de curiosidade por parte das concessionárias.

Este trabalho visa apresentar estudos esclarecedores sobre o desempenho desse dispositivo em relação aos sistemas elétricos reais e simulados, identificando-se as principais vantagens e limitações no emprego do T400L na proteção de LTs. Assim, espera-se contribuir com os profissionais atuantes na área.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar o desempenho das funções de proteção disponíveis no relé SEL-T400L em relação a registros reais e simulados de falta, visando identificação das potencialidades e limitações em relação às diversas condições de operação e curto-circuito. Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Aplicar as diferentes metodologias de testes adotadas para análise de desempenho do dispositivo de proteção avaliado;
- Parametrizar e avaliar o desempenho do relé real para casos reais e simulados de falta em *Alternative Transients Program* (ATP), os quais visam a representar o desempenho do equipamento para condições de operação características às redes elétricas reais;

### 1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Demonstrar, a partir dos cenários de faltas analisados, a complementariedade das funções de proteção embarcadas no T400L, bem como indicando aquelas cujas respostas são mais rápidas e também as possíveis fontes de retardo na atuação do dispositivo. Com isso, espera-se contribuir com o mercado de proteção nacional auxiliando na compreensão dessa nova tecnologia, a qual vem ganhando ano após ano espaço no setor elétrico.

### 1.5 PUBLICAÇÕES

Os estudos desenvolvidos durante o mestrado possibilitaram a publicação dos seguintes artigos em anais de conferências internacionais e nacionais:

- **RIBEIRO, J. P. G.**; LOPES, F. V. Modeling and Simulation of a Time-Domain Line Protection Relay. In: *The IET 14th International Conference on Developments in Power System Protection*. Belfast-UK, Irlanda do Norte, Março, 2018 <sup>1</sup>.
- **RIBEIRO, J. P. G.**; LOPES, F. V. Time-domain protection elements: Study and im-

---

<sup>1</sup>Artigo publicado no *The Journal of Engineering, IET Journals, ISSN 2051-3305*

plementation. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2018 (SBSE 2018)*. Niteroi-RJ, Brasil, Maio, 2018

- LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.**; HONORATO, T. R.; SILVA, K. M.; REZENDE JR., J. N.; AVIZ, C. A. M.; FERNANDES, R. O. Time-Domain Relay Performance Evaluation Considering Brazilian Fault Cases. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2019)*. Perpignan, França, Junho, 2019.

Como publicações correlatadas ao tema dessa pesquisa e obtidas no decorrer da pós-graduação, destacam-se:

- CUSTODIO, E. A.; LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.** Análise da Influência da Resposta Transitória de TPC sobre Funções de Proteção Aplicadas no Domínio do Tempo. In: *XII Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia Elétrica*. Curitiba-PR, Brasil, Agosto, 2017.
- CUSTODIO, E. A.; LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.** CCVT Impact on the TD21 Function Security. In: *2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Brasília-DF, Brasil, Novembro, 2017.
- LOPES, F. V.; RIBEIRO, C. M. S.; **RIBEIRO, J. P. G.**; LEITE JR., E. J. S. Performance Evaluation of the Traveling Wave-Based Differential Protection When Applied on Hybrid Transmission Lines. In: *The IET 14th International Conference on Developments in Power System Protection*. Belfast-UK, Irlanda do Norte, Março, 2018 <sup>1</sup>.
- LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.**; LEITE JR., E. J. S.; SILVA, K. M. Parametric Analysis of the Traveling Wave-Based Differential Protection TW87. In: *The IET 14th International Conference on Developments in Power System Protection*. Belfast-UK, Irlanda do Norte, Março, 2018 <sup>1</sup>.
- RIBEIRO, C. M. S.; LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.** Traveling wave-based differential protection applied to hybrid transmission lines: Performance and setting studies. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2018 (SBSE 2018)*. Niteroi-RJ, Brasil, Maio, 2018.

- LOPES, F. V.; NEVES, W. L. A.; LEITE JR., E. J. S.; **RIBEIRO, J. P. G.** Aplicação do Filtro Differentiator-Smoother Durante a Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão. In: *Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2018)*. João Pessoa-PB, Brasil, Setembro, 2018.
- RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.** ATP/MODELS Differentiator-Smoother Filter Model Validated Using Actual Time-Domain Relay. In: *2018 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. Brasília-DF, Brasil, Novembro, 2018.
- LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.**; LEITE JR., E. J. S.; AZEVEDO, L. G.; PIARDI, A. B.; OTTO, R. B. Desafios e Tendências no Processo de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Equipadas com Relés Microprocessados com Funções no Domínio do Tempo. In: *Décimo Oitavo Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré (XVIII ERIAC)*. Foz do Iguaçu-PR, Brasil, Maio, 2019.
- CUSTODIO, E. A.; LOPES, F. V.; **RIBEIRO, J. P. G.** Avaliação da Influência da Resposta Transitória de TPCs sobre Funções de Proteção Aplicadas nos Domínios da Frequência e do Tempo. In: *Décimo Oitavo Encontro Regional Ibero-Americano do Cigré (XVIII ERIAC)*. Foz do Iguaçu-PR, Brasil, Maio, 2019.
- LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S.; **RIBEIRO, J. P. G.**; AZEVEDO, L. G.; PIARDI, A. B.; OTTO, R. B.; NEVES, W. Using the Differentiator-Smoother Filter to Analyze Traveling Waves on Transmission Lines: Fundamentals, Settings and Implementation. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2019)*. Perpignan, França, Junho, 2019.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado como segue:

- No Capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica a respeito das funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, organizando-a de forma cronológica e enfatizando o

desenvolvimento daquelas aplicadas em dispositivos reais ou que constituíram um marco para o desenvolvimento desses.

- No Capítulo 3, apresenta-se a estrutura básica do T400L, enfatizando-se o processamento de sinais associado à extração das grandezas de interesse por parte das funções de proteção contidas nesse dispositivo, bem como o princípio de funcionamento das funções auxiliares cruciais ao seu desempenho.
- No Capítulo 4, apresenta-se a fundamentação teórica e a implementação lógica das funções de proteção embarcadas no relé SEL-T400L.
- No Capítulo 5, apresentam-se os ajustes primordiais ao correto funcionamento das funções de proteção avaliadas bem como são descritos os sistemas de potência a partir dos quais o T400L terá seu desempenho avaliado. Adicionalmente, também são apresentadas as metodologias de testes laboratoriais empregadas bem como o procedimento de parametrização relacionado ao equipamento.
- No Capítulo 6, por meio de registros reais e simulados de falta, obtém-se o desempenho do T400L tanto para casos pontuais quanto para simulações em massa. Enfatizar-se-á as principais limitações e vantagens do emprego do relé avaliado na proteção de linhas de transmissão.
- Por fim, no Capítulo 7, são listadas as conclusões sobre os resultados obtidos, destacando-se as propostas para trabalhos futuros visando a dar continuidade ao objeto de estudo do presente trabalho.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica acerca do desenvolvimento de funções de proteção de LTs baseadas no domínio do tempo obtidas a partir da aplicação de grandezas incrementais ou do conceito de ondas viajantes, enfatizando-se aquelas embarcadas em dispositivos reais de proteção de linhas ou que constituíram um marco para o desenvolvimento desses.

Sabe-se que as funções de proteção tradicionais são baseadas na estimação dos fasores fundamentais dos sinais de corrente e tensão da linha de transmissão monitorada. O procedimento de estimação fasorial impõe às funções tradicionais um atraso intrínseco devido ao procedimento de janelamento de dados, característico aos algoritmos de extração fasorial (Schweitzer; Hou, 1993). Assim, mesmo que para determinadas aplicações admita-se operar durante a transição da janela de dados (Schweitzer; Roberts, 1993), estimações fasoriais precisas são obtidas somente após a transição completa da janela de dados do regime de pré-falta para o de falta (Phadke; Thorp, 2009).

Visando acelerar a emissão de *trip* dos dispositivos de proteção de LTs, deve-se processar as informações contidas nos transitórios eletromagnéticos induzidos pelos distúrbios observados nos sistemas de transmissão (Schweitzer *et al.*, 2014a). Neste contexto, motivados pelo desenvolvimento de relés de proteção rápidos, pesquisadores propuseram diversas funções de proteção baseadas no processamento de grandezas instantâneas, evitando-se assim o procedimento de estimação fasorial (Chamia; Liberman, 1978; Yee; Esztergalyos, 1978; Lanz *et al.*, 1985; Kaszteny *et al.*, 2006; Schweitzer *et al.*, 2015).

Com o intuito de aumentar as margens de estabilidade de uma linha de transmissão da *Bonneville Power Administration's* (BPA), almejando assim o aumento da potência transferida sem comprometer a segurança do SEE, um sistema piloto para o desenvolvimento de um dos primeiros relés de proteção baseado na teoria das grandezas incrementais foi estabelecido (Cha-

---

mia; Liberman, 1978). Denominado de RALDA (ABB-RALDA, 1978), tratava-se de um relé direcional de potência baseado na análise de grandezas incrementais. A partir do cálculo da diferença de polaridade entre tensões e correntes incrementais, determinava-se a direcionalidade do defeito tomando-se como referência o terminal monitorado da linha, ou seja, se eram classificados como diretos ou reversos. Assim sendo, faltas na linha de transmissão eram identificadas quando os dispositivos de ambos os terminais observassem faltas diretas (Chamia; Liberman, 1978). Devido às limitações computacionais da época, observou-se que o processamento de sinais utilizado no dispositivo impactava a sua velocidade, observando-se atuações da ordem de meio ciclo da componente fundamental. Além disso, mostrou-se também que distorções nos sinais de tensão medidos provenientes da resposta transitória dos Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) comprometiam a identificação da direcionalidade do defeito (Chamia; Liberman, 1978; Yee; Esztergalyos, 1978), tornando o dispositivo dependente de TPCs de alta confiabilidade.

Dando continuidade ao desenvolvimento de funções de proteção baseadas em grandezas incrementais aplicadas no domínio do tempo, Vitins (1981) propôs um esquema direcional que utiliza das trajetórias elípticas descritas em um plano formado a partir das grandezas incrementais de tensão e corrente para identificar a direção da falta. Demonstra-se nesse trabalho a necessidade da existência de regiões de restrição nesse plano, tornando assim as indicações da proteção direcional seguras. A partir de inúmeros testes computacionais realizados em sistemas de transmissão de 500 kV modelados no *Transients Network Analyser* (TNA), evidenciou-se que a componente CC de decaimento exponencial presente nos sinais de corrente da linha monitorada comprometiam as trajetórias elípticas descritas. Assim, para não comprometer a segurança da proteção direcional em relação a tais cenários, mostrou-se necessário expandir a região de restrição. Consequentemente, retardos no tempo de atuação do esquema direcional de potência foram observados (Vitins, 1981).

Melhorias ao relé direcional de potência apresentado por Vitins (1981) foram propostas no trabalho de Lanz *et al.* (1985). Mostrou-se que as trajetórias elípticas descritas no plano formado por tensões e correntes incrementais eram estreitadas quando da utilização da corrente réplica incremental, tornando a indicação da direção da falta precisa durante toda a duração do defeito quando regiões de restrição nesse plano eram contabilizadas. Adicionalmente, Lanz *et*

---

*al.* (1985) propuseram a utilização de grandezas de operação integradas de tal forma que essa se mantenha em duas regiões específicas do plano operacional da proteção, uma para faltas diretas e outra para faltas reversas ao terminal monitorado. Alternativamente ao monitoramento das trajetórias descritas no plano operacional, compara-se a grandeza de operação com limiares pré-determinados para determinar a direção da falta (Lanz *et al.*, 1985).

Os desenvolvimentos realizados por Bewley (1931) no campo de ondas viajantes possibilitaram inúmeros avanços na área de proteção de linhas de transmissão (Dommel; Michels, 1978; Johns, 1980; Crossley; McLaren, 1983; Takagi *et al.*, 1977; Takagi *et al.*, 1979). A partir do processamento das ondas viajantes de tensão e corrente incidentes no terminal monitorado da linha, Dommel & Michels (1978) propuseram a contabilização de um discriminante denominado fator D para identificar a direcionalidade do defeito. Durante testes computacionais realizados, destacou-se que o fator D é elevado para defeitos a frente do terminal e próximo de zero para aqueles reversos (Dommel; Michels, 1978). Neste contexto, faltas na linha são identificadas a partir de um esquema de teleproteção entre os seus terminais. Salienta-se que um canal de comunicação de baixa largura de banda é necessário, visto que somente sinais digitais são transferidos de um terminal ao outro da linha. Adicionalmente, TPCs de alta confiabilidade são necessários para que as indicações seguras sejam viabilizadas pela função direcional.

Utilizando-se da teoria de separação de ondas, Johns (1980) propôs uma função direcional de potência baseada no processamento de ondas incidentes e refletidas no ponto de falta. Computando grandezas que se elevam para faltas diretas e que decrescem para faltas reversas, a partir da comunicação entre os terminais da linha, é possível determinar se a falta é interna ou externa ao elemento protegido (Johns, 1980). Destaca-se como limitação desse algoritmo o uso de ondas viajantes refletidas no ponto de falta, visto a dificuldade de identificá-las corretamente, principalmente quando da existência de linhas adjacentes cujo comprimento seja equivalente à distância entre a falta e o terminal monitorado.

Uma função de distância baseada na teoria de ondas viajantes que utiliza dados de um terminal fora proposta por Crossley & McLaren (1983). Utilizando-se de componentes modais e da teoria de correlação, identifica-se a onda refletida do ponto de falta. Neste contexto, a partir da diferença de tempo existente entre as primeiras ondas incidentes e refletidas no ponto de falta, estima-se a localização do defeito. Com base na comparação entre a localização obtida



e o comprimento da zona de proteção, pode-se determinar se a falta é interna ou externa à zona de alcance (Crossley; McLaren, 1983). Percebe-se que a utilização de ondas refletidas no ponto de falta constitui-se uma limitação para o presente algoritmo, visto que identificar corretamente essas frentes de ondas é desafiador até o presente momento (Lopes *et al.*, 2015).

Funções diferenciais de linha baseadas na análise de ondas viajantes foram propostas por Takagi *et al.* (1977) e Takagi *et al.* (1979). Utilizando-se das equações de Bergeron bem como de ondas de tensão e corrente incidentes para obter sinais diferenciais para cada terminal da linha monitorada, os autores observaram que para os cenários de faltas internas, as grandezas diferenciais se elevavam, enquanto que para as faltas externas, aproximavam-se de zero. Como consequência, defeitos na linha podiam ser corretamente identificados (Takagi *et al.*, 1977; Takagi *et al.*, 1979). Por determinar a separação temporal entre ondas de ambos os terminais, as funções requerem preciso alinhamento temporal entre sinais elétricos de tensão e corrente locais e remotos. Adicionalmente, devido à análise de medições de tensão, faz-se necessária a utilização de TPCs de alta confiabilidade para viabilizar atuações seguras e confiáveis à proteção.

Diante do exposto, constata-se que a década de 80 é reconhecidamente um período de elevada contribuição acadêmica e industrial na área de funções de proteção baseadas no domínio do tempo. Entretanto, após esse período, devido às limitações de *hardware* observadas, as quais limitavam a velocidade de resposta dos algoritmos, bem como os desafios associados ao controle de transitórios nas grandezas processadas no domínio do tempo, apenas nos anos 2000 é que contribuições importantes na área das funções de proteção rápidas voltaram à tona, principalmente com a reformulação de funções como a comparação de fases (função PC), dessa vez aplicada no domínio do tempo (Kasztenny *et al.*, 2006).

Por meio da análise de sinais modulados de corrente, a função PC identifica as faltas internas ou externas à LT. Possuindo versões de meio ciclo e de ciclo completo, as quais se baseiam na comparação de fases considerando apenas os semi-ciclos positivos e os semi-ciclos positivos e negativos, respectivamente, destacam-se que ambas são influenciadas pela componente CC de decaimento exponencial, a qual retarda o tempo de atuação da função de proteção. Ainda assim, operações em tempos da ordem de um quarto de ciclo são observados (Kasztenny *et al.*, 2006). Adicionalmente, a função de comparação de fases aplicada no domínio do tempo se destaca por

---

sua simplicidade, baixa quantidade de ajustes e necessidade de canais de comunicação de baixa largura de banda, visto que apenas informações de sinais digitalmente modulados são trocadas entre os terminais da linha. Neste contexto, devido aos benefícios destacados, fabricantes de relés de proteção desenvolveram dispositivos capazes de desempenhar a proteção unitária de linhas baseando-se na comparação de fases (GE MULTILIN L60, 2009).

Uma função de distância baseada na análise de grandezas incrementais é apresentada por Dzienis *et al.* (2010). Utilizando-se dos sinais de corrente e tensão obtidos na pré-falta bem como de grandezas incrementais de corrente e tensão, estimam-se tensões de operação e restrição no alcance da proteção. Comparando-as, pode-se determinar se a falta é interna ou externa à zona de proteção considerada (Dzienis *et al.*, 2010). Inúmeros testes realizados em dispositivos reais demonstraram que a componente CC de decaimento exponencial retarda a atuação da proteção. Adicionalmente, dificuldades relacionadas aos transitórios eletromagnéticos de alta frequência induzidos pela falta bem como distorções impostas aos sinais monitorados pelos transformadores para instrumentos contribuem para o sobrealcance da primeira zona da função de proteção, o que pode resultar em desligamentos indesejados. Por fim, tentando reduzir os efeitos que as componentes de alta frequência exercem sobre o algoritmo, valores médios da grandeza de operação são contabilizados e considerados na tomada de decisão do relé. Por consequência, tempos médios de atuação da ordem de 12 ms são observados (Dzienis *et al.*, 2010).

Conforme apresentado por Custodio *et al.* (2017), os transitórios eletromagnéticos gerados pelos TPCs impactam as funções de distância baseadas no domínio do tempo. Neste contexto, Finney *et al.* (2010) propuseram um elemento de distância que utiliza a transformada de Clarke em conjunto com um filtro para compensação da resposta em frequência dos TPCs para prover tempos de atuações mais rápidos e tornar o algoritmo mais robusto e seguro. Como resultado, tempos de atuação entre um quarto e meio ciclo são obtidos. Todavia, utilizando-se de funções de transferências obtidas a partir de modelos genéricos de TPCs, destaca-se que a compensação proposta pode vir a apresentar limitações perante modelos reais de TPCs, tais como os apresentados em Lopes *et al.* (2016).

Funções de proteção de linhas de transmissão aplicadas no domínio do tempo baseadas na utilização de grandezas incrementais bem como na teoria de ondas viajantes são propostas por

---

Schweitzer *et al.* (2014a). Dentre as funções de proteção apresentadas, destacam-se: duas funções direcionais de potência baseadas em grandezas incrementais e em ondas viajantes, TD32 e TW32, respectivamente, as quais são empregadas em um esquema POTT (*Permissive Overreaching Transfer Trip*); uma função de distância baseada na análise de grandezas incrementais, TD21; e uma função diferencial baseada na teoria de ondas viajantes, TW87.

Embora utilize de OV's de tensão e corrente incidentes para identificar a direcionalidade do distúrbio, a TW32 requer confiabilidade somente na informação de polaridade da primeira onda de tensão para garantir atuações rápidas. Guzmán *et al.* (2017) mostram que devido às capacitâncias parasitas comuns aos TPCs reais, mesmo que as ondas de tensão sejam atenuadas sobremaneira, percebe-se que a polaridade dessa é mantida. Utilizando-se somente de ondas viajantes de corrente, obtém-se o esquema diferencial empregado na TW87. As funções baseadas no processamento de grandezas incrementais empregam a corrente réplica incremental para minimizar os retardos na atuação dessas devido aos efeitos provocados pela componente CC de decaimento exponencial bem como para prover maior segurança às suas indicações. Adicionalmente, limiares adaptativos são empregados na TD32 com o intuito de acelerar o envio de permissivo. Por fim, utilizando-se do perfil de tensão ao longo da linha, faltas na zona de proteção podem ser identificadas por meio da TD21, a qual pode ser empregada no esquema *stand alone* ou em transferência direta de *trip* (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

O primeiro dispositivo de proteção de linhas de transmissão a empregar unicamente funções aplicadas no domínio do tempo baseando-se nas teorias de grandezas incrementais e de ondas viajantes foi apresentado por Schweitzer *et al.* (2015). Denominado de SEL-T400L (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), esse dispositivo emprega as funções TD32, TW32, TD21 e TW87 de forma complementar, viabilizando atuações rápidas para os casos mais adversos de curtos-circuitos e mantendo a segurança, por meio do bloqueio dessas funções, quando da incerteza da natureza e da severidade do distúrbio. Dessa forma, a *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) enfatiza a necessidade do uso de relés companheiros baseados nas funções de proteção tradicionais conferindo confiabilidade ao esquema de proteção mesmo perante os cenários menos adversos de faltas, para os quais as funções fundamentadas na teoria de ondas viajantes e de grandezas incrementais podem não atuar (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

O desempenho das funções empregadas no SEL-T400L é comparado com o de funções tradicionais para alguns casos reais por meio do uso da funcionalidade de *playback* (Schweitzer *et al.*, 2015). Demonstra-se que essas funções atuam mais rapidamente que os algoritmos tradicionais mantendo-se a segurança nas indicações. Adicionalmente, devido à ausência de registros oscilográficos da ordem de megahertz disponíveis, as funções baseadas em ondas viajantes tiveram seu desempenho ilustrado por meio de registros simulados em plataforma do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) (Schweitzer *et al.*, 2015). Neste contexto, o SEL-T400L começa a ser instalado em diversas linhas de transmissão do cenário mundial visando ilustrar seu desempenho perante casos reais de falta (Guzmán *et al.*, 2017; Metzger *et al.*, 2018; Schweitzer *et al.*, 2018; Sharma; Mynam, 2018).

Dispositivos SEL-T400L instalados em um complexo sistema de transmissão mexicano ilustram os benefícios promovidos ao esquema POTT quando da utilização de um elemento direcional de potência baseado em ondas viajantes (Guzmán *et al.*, 2017). Envios de permissivos em tempos médios de 116  $\mu$ s viabilizados pela TW32 permitem acelerar significativamente a atuação da proteção. Adicionalmente, o desempenho das funções empregadas nesse dispositivo frente aos transformadores para instrumentos reais são apresentados. Destacam-se que os transformadores de corrente (TCs) são capazes de representar com precisão os transitórios eletromagnéticos em uma banda de frequência de até 100 kHz, enquanto que os TPCs, graças às capacitâncias parasitas, são capazes de manter a polaridade das primeiras ondas de tensão incidentes mesmo que as atenuando sobremaneira.

Um sistema piloto implementado em uma linha de subtransmissão da *Baltimore Gas and Electric Company* (BGE) demonstrou a necessidade de aplicação de um relé companheiro baseado em funções de proteção tradicionais para garantir confiabilidade ao esquema de proteção da linha frente às situações de perda do canal de comunicação entre relés SEL-T400L (Metzger *et al.*, 2018). Além disso, mesmo que em quantidade reduzida, demonstrou-se que os ajustes são cruciais para atuações seguras e confiáveis do dispositivo (Metzger *et al.*, 2018). Por fim, evidencia-se que as atenuações impostas aos sinais elétricos medidos por meio de transformadores de potencial (TPs) disponíveis em subestação de distribuição e subtransmissão podem comprometer a atuação do relé de proteção. Adicionalmente, um sistema piloto implementado no sistema de transmissão indiano demonstra que a TD21 pode ter sua operação restrin-

---

gida frente aos cenários cuja resistência de falta é não-nula bem como ilustra os benefícios do processamento de sinais realizado em escala de microssegundos, tais como a possibilidade de identificação de faltas incipientes (Sharma; Mynam, 2018).

Embora já aplicado em diversos sistemas piloto no cenário mundial, somente avaliações de atuações para casos pontuais foram obtidas para o relé SEL-T400L. Todavia, a partir de modelos computacionais existentes (Ribeiro; Lopes, 2018a; Ribeiro; Lopes, 2018b), obteve-se o desempenho do dispositivo frente a simulações em massa (Ribeiro; Lopes, 2018a; Lopes *et al.*, 2018). Entretanto, é reconhecido que procedimentos internos ao equipamento são mantidos em sigilo, tal como a frequência de corte do filtro passa-baixas aplicado na etapa de obtenção das grandezas incrementais utilizadas (Schweitzer *et al.*, 2016). Assim, ilustrar o desempenho do dispositivo real via modelos apresenta limitações. Neste contexto, o uso do relé real mostra-se essencial.

Diante do exposto e também devido aos inúmeros questionamentos ainda existentes a respeito do desempenho do dispositivo, faz-se necessária a análise de simulações em massa com o intuito de identificar as vantagens e limitações do emprego do relé SEL-T400L para a proteção de linhas, demonstrando os casos em que as suas funções de proteção se complementam, bem como indicando aquelas cujas respostas são mais rápidas e também as possíveis fontes de retardo na atuação do dispositivo. Com isso, espera-se contribuir com o mercado de proteção nacional auxiliando na compreensão dessa nova tecnologia, a qual vem ganhando ano após ano espaço no setor elétrico.

## CAPÍTULO 3

# PROCESSAMENTO DE SINAIS E A ESTRUTURA BÁSICA DO T400L

Apresenta-se neste capítulo a fundamentação teórica necessária para compreensão do desempenho do relé SEL-T400L, destacando-se o processamento de sinais associado à extração das grandezas de interesse, a estrutura básica da parte de proteção do dispositivo e o princípio de funcionamento de cada uma das principais funções auxiliares do equipamento avaliado.

### 3.1 FALTAS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Mesmo que pequenas variações nos parâmetros elétricos das LTs sejam observadas durante o período de operação normal dos SEEs, as quais são ocasionadas por modificações climáticas bem como por mudanças na vegetação que circunda a linha, entende-se que tais parâmetros são bem definidos e praticamente constantes na maior parte do tempo de operação desses sistemas. Neste contexto, ocorrências responsáveis por provocar modificações relevantes nos parâmetros elétricos induzem transitórios eletromagnéticos no SEE, cuja amplitude depende das características operacionais bem como da topologia de aterramento da rede elétrica em questão (ZANETTA Jr., 2003; Lopes, 2014b).

Continuamente, os grandes sistemas de transmissão de energia elétrica estão sujeitos à incidência de diferentes tipos de distúrbios elétricos, dentre os quais as faltas se destacam como um dos mais preocupantes para a operação desses sistemas, visto que provocam desligamentos não programados e, geralmente, submetem a rede elétrica a grandes estresses eletromecânicos. De fato, as faltas incidentes em LTs provocam modificações repentinas no ponto de equilíbrio da rede elétrica, direcionando a operação dessa para condições anormais de atuação. No novo ponto de equilíbrio operacional, observa-se que as magnitudes e fases das tensões e correntes do sistema, a depender das características da falta, podem alcançar valores que colocam em

risco a estabilidade dos sistemas elétricos e a segurança de pessoas e equipamentos, justificando-se o emprego de sistemas de proteção rápidos, seguros e confiáveis (Anderson, 1999; Altuve; Schweitzer, 2010).

Durante a transição entre regimes de operação distintos, a exemplo da passagem de um estado normal de operação para um regime permanente de falta, identifica-se um período durante o qual são observados transitórios eletromagnéticos referentes à falta. Assim sendo, a partir do processamento das informações contidas em tais transitórios, obtêm-se parâmetros importantes relacionados à natureza, localização, direcionalidade, tipo e resistência da falta (Greenwood, 1971; Saha *et al.*, 2010). Dessa forma, utilizando-se de técnicas de processamento de sinais adequadas, torna-se possível extrair informações importantes a respeito do defeito, mesmo durante o período transitório de falta, o qual é reconhecidamente curto. Baseando-se nessa possibilidade é que dispositivos de proteção rápidos aplicados no domínio do tempo vêm sendo desenvolvidos (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

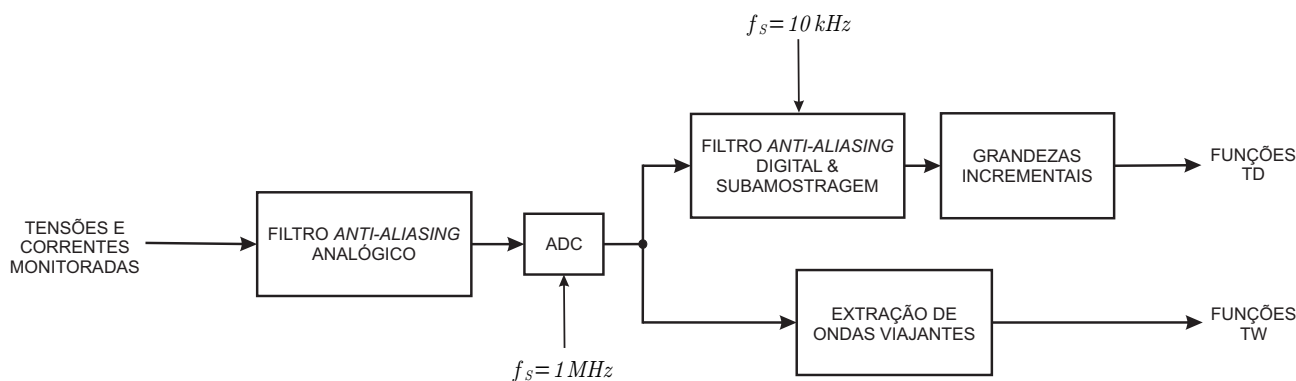
Sendo o relé SEL-T400L o objeto de avaliação do presente trabalho, torna-se necessária a compreensão de conceitos nos quais se embasam suas funções de proteção. Neste contexto, destacam-se principalmente as técnicas de processamento de sinais utilizadas nesse dispositivo com o objetivo de extrair as componentes transitórias de interesse e possibilitar a implementação dos algoritmos de proteção. Assim, apresentam-se a seguir o sistema de aquisição de dados e as etapas de processamento de sinais aplicadas no T400L, as quais são necessárias para obtenção das grandezas incrementais, bem como para extração das OV's.

## 3.2 PROCESSAMENTO DE SINAIS

As funções de proteção embarcadas no T400L são baseadas nas teorias de OV's e de grandezas incrementais, as quais fundamentam os mecanismos necessários ao processamento dos transitórios eletromagnéticos de alta frequência induzidos no ponto de falta quando da incidência de distúrbios na linha de transmissão monitorada. Na literatura, diversas metodologias distintas para o processamento de grandezas incrementais bem como para a extração de OV's são propostas, que estão diretamente relacionadas à precisão das funcionalidades às quais se aplicam. Visando à compreensão do princípio de funcionamento e do desempenho do disposi-

tivo analisado, apresenta-se na Figura 3.1 o diagrama simplificado do processamento de sinais aplicado no T400L para extração das grandezas de interesse, onde  $f_s$  representa a frequência de amostragem.

**Figura 3.1:** Diagrama Simplificado de Processamento de Sinais do Relé SEL-T400L.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Inicialmente, os sinais de tensão e corrente analógicos oriundos dos transformadores para instrumentos utilizados na aquisição das grandezas elétricas de interesse são aplicados à entrada de um filtro *anti-aliasing* analógico cujo objetivo é evitar a sobreposição de espectros durante a etapa de digitalização (Phadke; Thorp, 2009), na qual os sinais filtrados são digitalizados a partir de um conversor analógico-digital (ADC) com frequência de amostragem de 1 MHz e resolução de 18 bits (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). É importante destacar que a alta precisão temporal é necessária para processar as informações contidas nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência, as quais se propagam sob a forma de OV's.

Subsequente ao procedimento de digitalização, encontra-se o processo de obtenção das grandezas incrementais, ou seja, a subamostragem dos sinais digitais de 1 MHz para uma frequência de amostragem de 10 kHz conjuntamente com a aplicação de um filtro *anti-aliasing* digital, cujo intuito é evitar a sobreposição espectral durante a etapa de subamostragem e eliminar parte das componentes de alta frequência indesejáveis ao presente procedimento. Assim, são obtidos os sinais a partir dos quais são extraídas as grandezas incrementais que serão utilizadas nas funções TD (TD21 e TD32).

Simultaneamente ao procedimento de obtenção das grandezas incrementais, os sinais digitais com resolução temporal de 1  $\mu$ s são aplicados à etapa de extração das OV's, na qual se utiliza o filtro *differentiator-smoother* (DS), as quais serão utilizadas pelas funções TW (TW32 e TW87).



### 3.2.1 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 operando isoladamente (Irwin; Nelms, 2010). 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 gerados unicamente pelo defeito. Dessa forma, as tensões e correntes em qualquer ponto da rede elétrica sob falta são determinadas pelo somatório das contribuições de pré-falta e de falta.

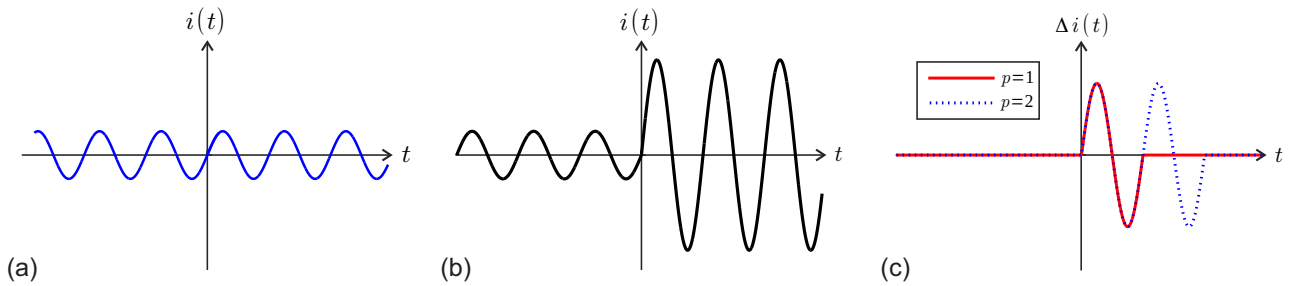
Baseando-se na análise dos sinais tomados do circuito puro de falta é que as funções de proteção fundamentadas na teoria de grandezas incrementais são programadas no relé SEL-T400L. Para tanto, os sinais da rede elétrica sob falta (sistema monitorado) são medidos a cada instante de processamento do dispositivo de proteção, os quais são armazenados em *buffers*. Assim, ocorrendo uma falta na rede elétrica, as medições atuais são tomadas como sendo do sistema sob falta, enquanto que as medições atrasadas são relacionadas ao circuito de pré-falta. Desse modo, subtraindo-se as medições atuais das medições atrasadas, obtêm-se as grandezas elétricas referentes ao circuito puro de falta, viabilizando assim a análise das variações impostas unicamente pelo defeito. Tradicionalmente, os sinais resultantes da subtração mencionada são denominados de grandezas incrementais, as quais podem ser calculadas da seguinte forma (Schweitzer *et al.*, 2014a):

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

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

Na Figura 3.2, ilustra-se o comportamento da grandeza incremental de corrente obtida para diferentes valores de  $p$  quando da aplicação de uma falta iniciando-se no cruzamento da tensão pelo zero em uma linha de transmissão genérica. Do exposto, percebe-se que, idealmente, as grandezas incrementais contêm as informações referentes aos transitórios gerados na rede

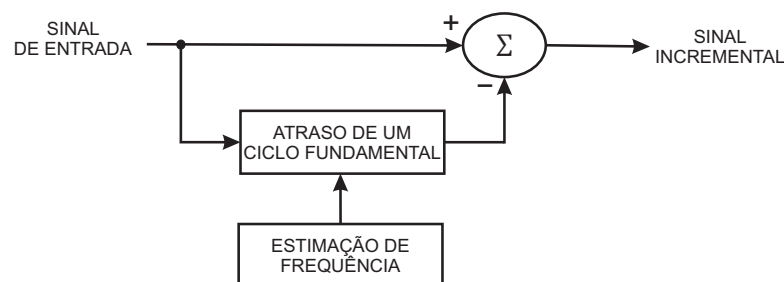
**Figura 3.2:** Sinais de corrente para uma falta com ângulo de incidência nulo: (a) Corrente de carregamento; (b) Corrente Monitorada; (c) Grandeza incremental de corrente obtida para diferentes valores de  $p$ .



Fonte: Autoria própria.

elétrica sob falta. Por consequência de seu equacionamento matemático, percebe-se que as grandezas incrementais perduram por um período de tempo diretamente proporcional a  $p \cdot T$ . Dessa forma, constata-se que transcorrido esse período, os sinais obtidos utilizando-se (3.1) já não são mais válidos, visto que todas as amostras utilizadas para sua obtenção se encontram no período de falta. Assim, perde-se a informação referente ao regime de pré-falta do sistema monitorado, inviabilizando a derivação das grandezas incrementais. Por isso, as funções de proteção baseadas na teoria das componentes incrementais são liberadas para operação durante o período em que tais componentes encontram-se válidas, devendo ser bloqueadas  $p$  ciclos após o início do distúrbio (Schweitzer *et al.*, 2015; SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Apresenta-se na Figura 3.3, a lógica de derivação das grandezas incrementais utilizadas nas funções TD do T400L. Observa-se que os sinais incrementais são obtidos a partir da diferença entre valores atuais e amostras atrasadas em um ciclo fundamental, ou seja, adota-se  $p = 1$ . Sabe-se que variações contínuas no equilíbrio entre geração e consumo de energia elétrica e a ocorrência de curtos-circuitos provocam modificações constantes na frequência da rede elétrica. Dessa forma, com o objetivo de rastrear as alterações na frequência do sistema monitorado visando obter grandezas incrementais precisas, estima-se a frequência da rede elétrica em questão, possibilitando assim que o período fundamental dos sinais elétricos monitorados seja atualizado (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Com o intuito de controlar os transitórios eletromagnéticos contidos nas grandezas incrementais obtidas ao final do processo ilustrado na Figura 3.3, os sinais incrementais obtidos e que serão utilizados nas funções baseadas em componentes incrementais são filtrados a partir de filtros passa-baixas (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Além disso, como resultado da filtragem adotada, é possível

**Figura 3.3:** Lógica de derivação das grandezas incrementais utilizadas no T400L.

**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

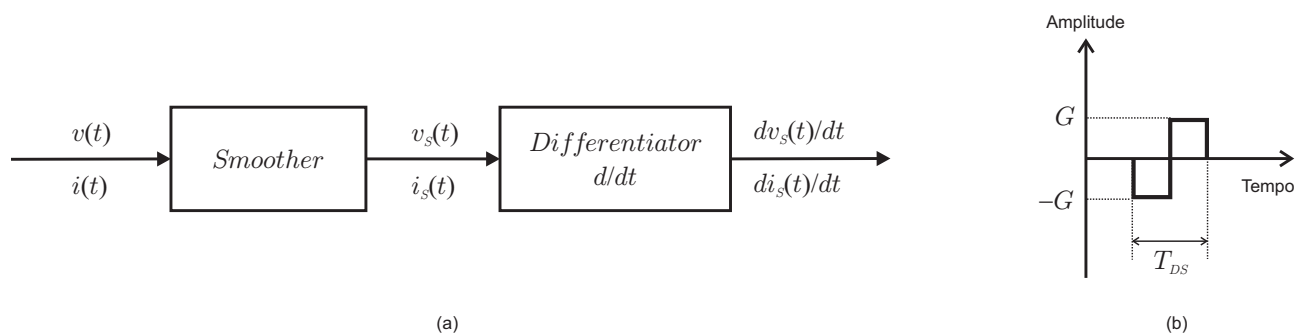
modelar os sistemas de potência a partir de um simples circuito RL, simplificando as equações de operação referentes às funções TD (Kasztenny *et al.*, 2016).

### 3.2.2 Extração de Ondas Viajantes

Sabe-se que durante a ocorrência de faltas em linhas de transmissão, a tensão no ponto de falta colapsa, modificando-se abruptamente a condição de operação do sistema de transmissão. Assumindo a ocorrência de uma falta franca (resistência de falta nula), observa-se que a tensão no ponto de falta reduz do valor de pré-falta para zero volts, de tal forma que uma mudança sob a forma de degrau é identificada no sinal de tensão da fase defeituosa. Perante tais situações, transitórios eletromagnéticos são induzidos no ponto de defeito, os quais se propagam em direção a ambos os terminais da linha monitorada. Tipicamente, esses transitórios de alta frequência são denominados de ondas viajantes.

O relé SEL-T400L possui funções de proteção e localização de faltas baseadas na teoria de ondas viajantes. Na literatura, diversas metodologias são reportadas com o objetivo de extrair as informações contidas nos transitórios decorrentes de defeitos incidentes no sistema monitorado (Saha *et al.*, 2010). Dentre as existentes, destaca-se uma em particular: o filtro *differentiator-smoother*, o qual é utilizado no T400L (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Na Figura 3.4, apresentam-se o diagrama de blocos e a janela de dados referente a esse filtro.

O filtro DS é composto por duas etapas encadeadas: uma primeira de suavização seguida de uma etapa de diferenciação do sinal de entrada. A etapa de suavização (*smoother*) é equivalente a um filtro passa-baixas, por meio da qual os efeitos da distorção nos sinais de corrente e

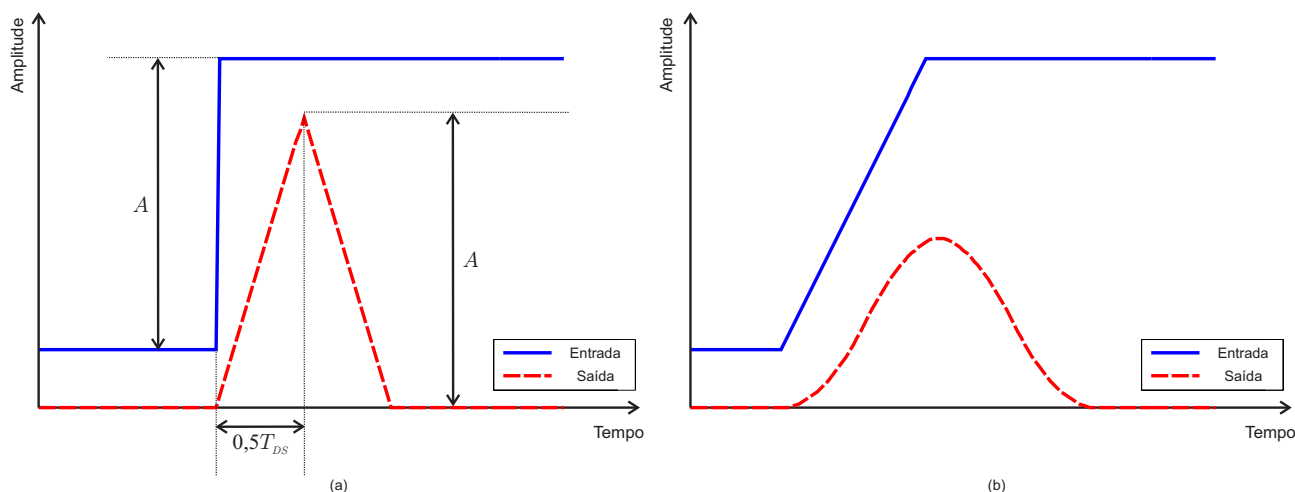
**Figura 3.4:** Filtro DS: (a) Diagrama de blocos; (b) Janela de dados.

**Fonte:** Autoria própria.

tensão são ligeiramente reduzidos, tornando a borda de subida dos sinais transitórios mais suave (Schweitzer *et al.*, 2014b). Em contrapartida, na etapa subsequente (bloco *differentiator*), as mudanças com características próximas a um degrau são transformados em um pulso com formato triangular. Assim sendo, obtêm-se, ao final do processo de filtragem, sinais cujas discontinuidades representam as OV's de tensão e corrente utilizadas nas funções de proteção e localização embarcadas no T400L. Deve-se ressaltar que esse processo de filtragem é realizado no domínio do tempo e em tempo real, utilizando-se uma janela de dados com duração de  $T_{DS}$  segundos (valor típico de  $20 \mu s$ ), a qual é apresentada na Figura 3.4. Nota-se que a primeira metade dos coeficientes da janela de dados possui ganho de  $-G$ , enquanto que a segunda metade, ganho de  $G$ .

Observando-se a Figura 3.5, constata-se que a resposta do filtro DS, para uma entrada sob a forma de degrau, é uma função triangular cuja base possui duração de  $T_{DS}$  segundos. Por sua vez, para entradas em rampa, o que aconteceria para cenários de transitórios de falta amortecidos, a saída do filtro se aproxima de uma parábola, cuja largura dependerá de quão amortecido se encontra o sinal de entrada. Nas aplicações em que se utilizam as OV's extraídas por meio do filtro DS, assume-se como instante de chegada das ondas no terminal monitorado da linha aquele referente ao pico da saída triangular do filtro, o qual se encontra atrasado em  $0,5 \cdot T_{DS}$  segundos do instante real de incidência das OV's no terminal e é inerente ao processamento de dados associado à extração das ondas eletromagnéticas via filtro DS.

O ganho  $G$  da janela de dados do filtro DS é ajustado de tal forma que a amplitude da saída triangular corresponda à amplitude da entrada sob a forma de degrau. Assumindo que no sinal de entrada do filtro seja observada uma variação abrupta que se aproxima de um degrau,

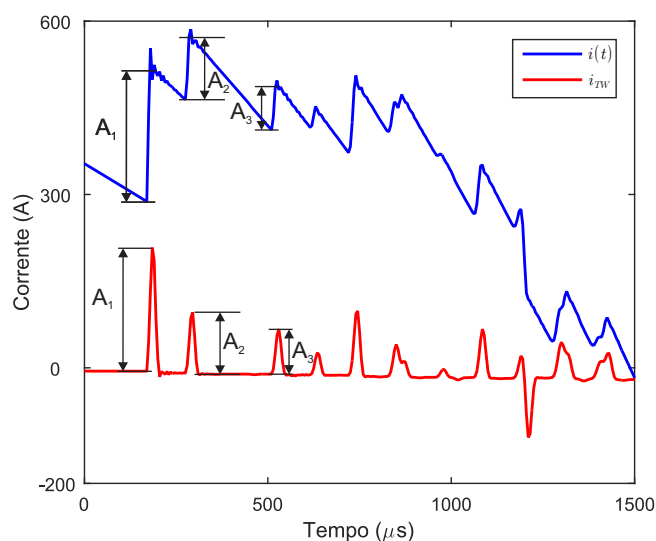
**Figura 3.5:** Resposta do filtro DS para diferentes sinais de entrada: (a) Degrau; (b) Rampa.

**Fonte:** Autoria própria.

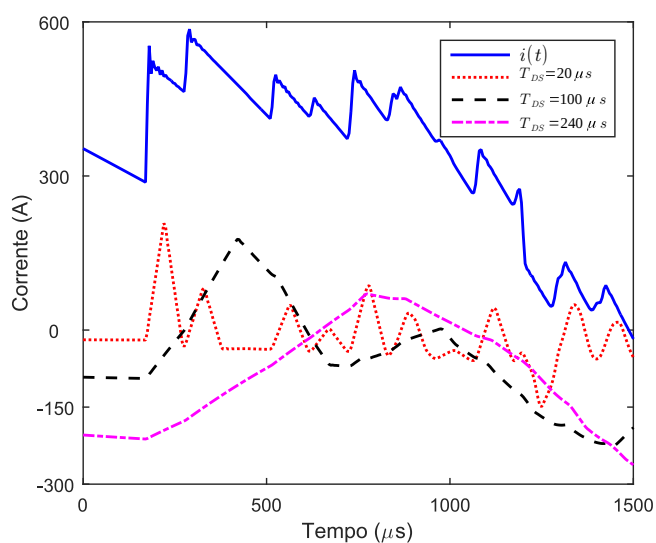
ao convoluir os coeficientes da janela de dados do filtro com aqueles referentes a esse sinal de entrada, infere-se que a amplitude do sinal de saída do filtro igualar-se-á àquela observada na entrada, ou seja,  $A$ , conforme destacado na Figura 3.5. Para tanto, o ganho do filtro é ajustado como sendo  $G = \frac{2}{N_{DS}}$ , em que  $N_{DS}$  é o número de coeficientes observados na janela de dados utilizada para implementar o filtro DS empregado (Lopes *et al.*, 2019).

A aplicação do filtro DS em um registro de falta simulado em ATP é ilustrada na Figura 3.6. Para os cenários mais adversos de curtos-circuitos em LTs, observa-se que as variações nos sinais de corrente e tensão monitorados se aproximam de degraus quando considerada escala de tempo da ordem de alguns microssegundos, conforme indicado na Figura 3.6. Assim, constata-se que, a partir da aplicação do filtro DS com o ganho  $G$  ajustado conforme mencionado anteriormente, é possível obter OV's com formatos triangulares cujas amplitudes e polaridades respeitam as variações observadas no sinal de entrada.

Dos resultados apresentados até então, observa-se que a duração da janela de dados utilizada no filtro DS é diretamente proporcional à largura dos pulsos triangulares observados na sua saída. Assim sendo, a depender do valor de  $T_{DS}$  utilizado e das características da rede elétrica em questão, os transitórios eletromagnéticos extraídos via filtro DS podem ser sobrepostos, perdendo-se as informações contidas naquelas OV's que incidem no terminal após a chegada da primeira onda incidente, conforme ilustrado na Figura 3.7. Observa-se que quão maior for o valor de  $T_{DS}$  utilizado, mais distante estará o pico da saída triangular do filtro da borda

**Figura 3.6:** Aplicação do filtro DS em um registro simulado de falta.**Fonte:** Autoria própria.

de subida dos transitórios eletromagnéticos contidos nos sinais monitorados. Assim, pode-se comprometer a detecção das ondas que incidem no terminal da linha em instantes de tempo próximos entre si. Portanto, constata-se que a duração da janela de dados do filtro DS deve ser ajustada minuciosamente de acordo com as informações transitórias a serem processadas, as quais variam a depender do princípio de operação de funções de proteção e de funções de localização de faltas.

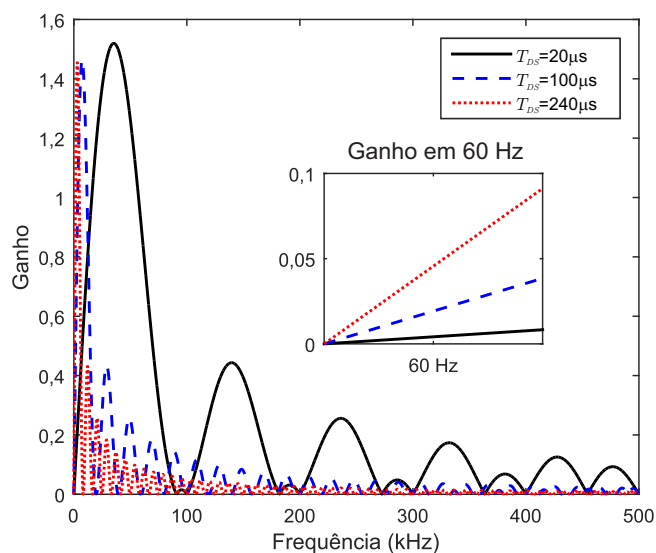
**Figura 3.7:** Influência de  $T_{DS}$  no desempenho do filtro DS.**Fonte:** Autoria própria.

Por fim, apresenta-se na Figura 3.8, a resposta em frequência do filtro DS quando considera-

dos diferentes valores de  $T_{DS}$ . Do exposto, percebe-se que a atenuação das componentes de alta frequência aumenta proporcionalmente com o valor de  $T_{DS}$  (Lopes *et al.*, 2019). Considerando  $T_{DS} = 20\mu s$ , observa-se que os transitórios cujas frequências são próximas a 100, 200, 300, 400 e 500 kHz ou até mesmo dentro do intervalo observado entre elas são significativamente atenuadas, enquanto que as demais frequências possuem ganho suficiente para sensibilizar a saída do filtro.

Por outro lado, aumentando o valor de  $T_{DS}$ , nota-se que frequências acima de 100 kHz são atenuadas de forma significativa, o que corrobora com os resultados apresentados na Figura 3.7, na qual demonstrou-se que valores elevados de  $T_{DS}$  não eram adequados para avaliar as componentes de alta frequência presentes no sinal de entrada do filtro DS. Adicionalmente, observa-se que quão menor for a duração da janela de dados utilizada, mais atenuada será a frequência fundamental, a qual, neste trabalho, é 60 Hz. Essa constatação explica as diferenças observadas na saída do filtro DS nos primeiros instantes da Figura 3.7, o que na verdade representa a componente fundamental vista em escala de microssegundo.

**Figura 3.8:** Resposta em frequência do filtro DS considerando diferentes valores de  $T_{DS}$ .



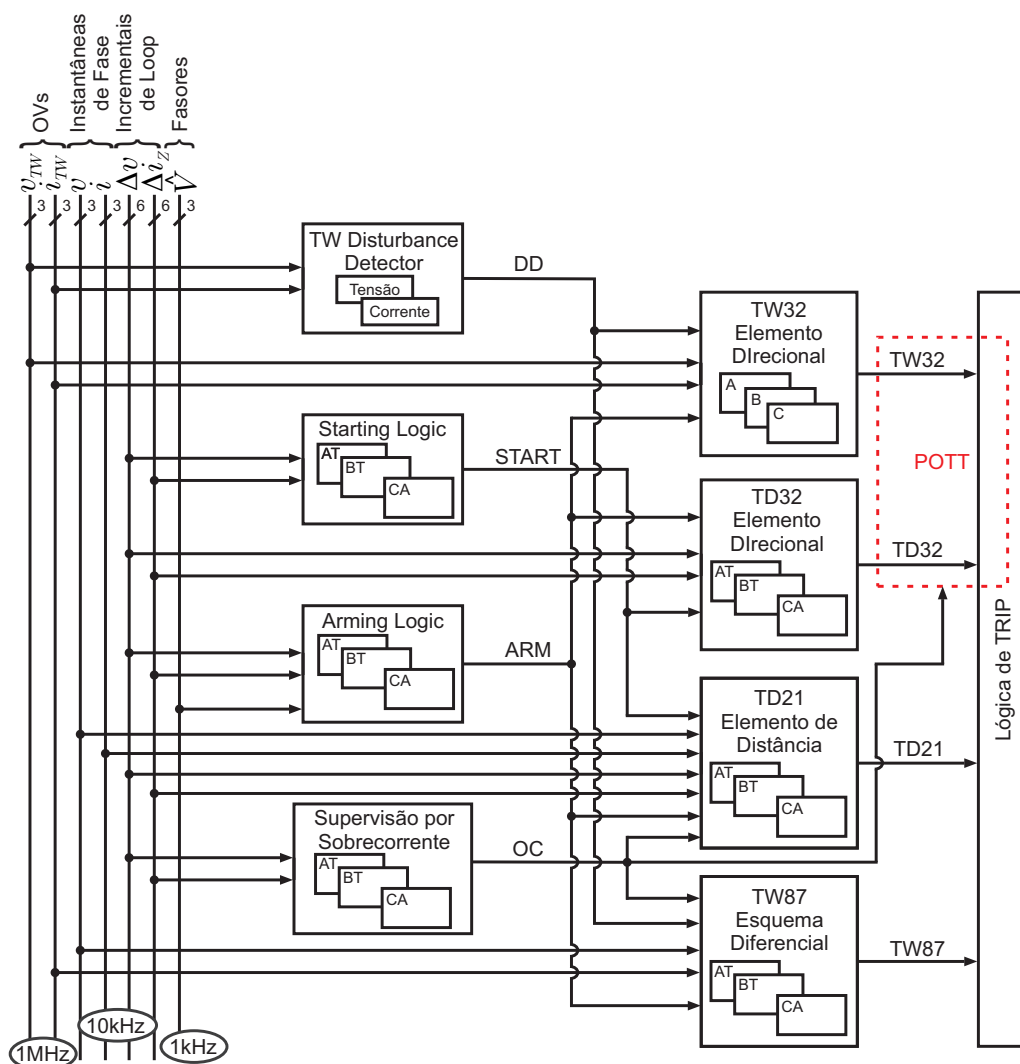
Fonte: Autoria própria.

### 3.3 ESTRUTURA BÁSICA

Apresenta-se, na Figura 3.9, um diagrama básico contendo as funções de proteção e as funções auxiliares do dispositivo de proteção avaliado. Basicamente, os sinais de entrada de

cada uma dessas funções são obtidos a partir das etapas de processamento de sinais apresentadas anteriormente, destacando-se: as OV's de corrente e tensão,  $i_{TW}$  e  $v_{TW}$ , respectivamente; tensões e correntes instantâneas,  $v$  e  $i$ , respectivamente; tensões e correntes réplica incrementais de loop,  $\Delta v$  e  $\Delta i_Z$ , respectivamente; e os fasores de tensão,  $\hat{V}$ . Cada uma dessas grandezas é processada em taxas de amostragem distintas, as quais variam de acordo com os transitórios eletromagnéticos cujas informações serão analisadas e que determinarão a atuação ou bloqueio de cada um dos elementos de proteção. Neste contexto, as OV's, as grandezas incrementais e instantâneas e os fasores são processados em taxas de amostragem de 1 MHz, 10 kHz e 1 kHz, respectivamente (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

**Figura 3.9:** Visão geral das funções contidas no T400L.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Os elementos de proteção baseados em grandezas incrementais e a supervisão por sobrecor-



rente fundamentam-se matematicamente na utilização da corrente réplica incremental  $\Delta i_Z$ , a qual possibilita que as funções de proteção incrementais possuam relações algébricas equivalentes às observadas para as funções fasoriais tradicionais, a exemplo da função 32Q (Schweitzer *et al.*, 2014a; SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Além disso, conforme fundamentação teórica apresentada no Apêndice A e resultados comprovados por Ribeiro *et al.* (2016),  $\Delta i_Z$  é praticamente imune à componente CC de decaimento exponencial, visto que o seu equacionamento matemático se equivale ao do filtro mímico tradicional proposto por Benmouyal (1995). Por fim, a corrente réplica possui ganho unitário na frequência fundamental do sistema elétrico de potência quando ajustada apropriadamente, conforme destacado no Apêndice A, o qual visa apresentar a fundamentação teórica associada à  $\Delta i_Z$  bem como o desenvolvimento dos *loops* de falta para adequação das funções de proteção aos sistemas elétricos trifásicos.

Encontram-se embarcadas no T400L diversas funções auxiliares que possibilitam o funcionamento dos elementos de proteção, da detecção de distúrbios e da distinção dos eventos de alta e baixa energia, a saber: *Arming Logic*; *TW Disturbance Detector*; *Starting Logic*; e a Supervisão por Sobrecorrente. A *Arming Logic* é uma função auxiliar livre de ajustes responsável por supervisionar as condições do sistema protegido. Basicamente, com o intuito de identificar a presença de um regime permanente de operação, as tensões e correntes da linha são continuamente monitoradas. Não havendo transitórios eletromagnéticos em demasia nos sinais avaliados pelo relé, as funções de proteção são liberadas para atuação, caso contrário, são bloqueadas.

Por outro lado, o T400L possui duas funções de monitoramento de distúrbios elétricos incidentes na linha monitorada bem como em sua circunvizinhança, a saber: *Starting Logic* e *TW Disturbance Detector*. A *Starting Logic* é uma função de detecção de distúrbios aplicada aos elementos de proteção baseados em grandezas incrementais e tem como função primária monitorar continuamente os *loops* de falta associados à proteção em sistemas trifásicos, conforme apresentado no Apêndice A, liberando para operação aqueles que se encontram sob falta e restringindo os demais. Adicionalmente, a detecção de distúrbio para os elementos de proteção baseados em ondas viajantes é desempenhada pela função *TW Disturbance Detector*, a qual é responsável por marcar temporalmente a transição de um regime de pré-falta para um regime de falta. Para tanto, monitoram-se adaptativamente os níveis relativos às OV's de tensão e

corrente na linha protegida (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

As funções de proteção no domínio do tempo são baseadas na análise de transitórios eletromagnéticos decorrentes dos distúrbios incidentes na linha monitorada. Visando distinguir os transitórios de baixa energia daqueles de alta energia, ou seja, diferenciar eventos relacionados aos chaveamentos observados na linha daqueles referentes aos curtos-circuitos, torna-se necessário monitorar o incremento de corrente provocado pelo distúrbio incidente. Para tanto, a partir de uma lógica de supervisão por sobrecorrente que compara a integral do módulo da corrente réplica incremental com a integral da corrente de *pick-up*, a ocorrência ou não de curto-circuito na linha é determinada, liberando a operação dos esquemas de proteção apenas quando da existência de falta (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

As funções direcionais de potência TW32 e TD32 identificam a direcionalidade do distúrbio a partir da diferença de polaridade entre  $v_{TW}$  e  $i_{TW}$  bem como entre as grandezas incrementais de tensão e corrente, respectivamente. Combinadas em um esquema *POTT*, as funções TW32 e TD32 indicam falta na linha monitorada quando em ambos os terminais dessa constata-se falta direta e a lógica de sobrecorrente indica curto-circuito. Diferentemente das funções de distância tradicionais, a TD21 não tem seu princípio de operação baseado na estimação de impedância, mas na análise do perfil de tensão da linha. Para tanto, tensões de operação e restrição são estimadas e comparadas no alcance da proteção, identificando-se curto-circuito na linha quando a tensão de operação é superior a de restrição e a lógica de supervisão por sobrecorrente é satisfeita. Diferentemente das funções direcionais de potência, a TD21 pode ser aplicada em um esquema de proteção *stand alone*, no qual se elimina a necessidade de canais de comunicação, bem como no esquema de *Direct Transfer Trip* (DTT). Por fim, a função diferencial de linha baseada em ondas viajantes, TW87, analisa polaridade, magnitude e distância temporal entre as OV's de corrente em ambos os terminais da linha para identificar se a falta é interna ou externa ao elemento protegido.

Assim, apresentada a visão geral a respeito das funções de proteção e das principais funções auxiliares do T400L, nas próximas seções do presente capítulo, detalhar-se-á o princípio de operação e as lógicas das funções auxiliares, o que será de suma importância para a compreensão dos resultados apresentados neste trabalho. No capítulo seguinte, apresentar-se-á a fundamentação detalhada das funções de proteção avaliadas.

## 3.4 FUNÇÕES AUXILIARES

Nesta seção, apresentam-se os detalhes referentes às principais funções auxiliares. Para tanto, inicialmente, fundamentam-se tais funções, as quais participam diretamente nas lógicas de operação dos elementos de proteção, para em seguida, quando necessário, apresentar a lógica de operação associada.

### 3.4.1 *Arming Logic*

A *Arming Logic* é uma função auxiliar livre de ajustes responsável por verificar se a linha protegida encontra-se energizada bem como se os sinais de corrente e tensão da linha monitorada estão em regime permanente, ou seja, se não há transitórios eletromagnéticos em demasia anteriormente à ocorrência de uma falta. Caso qualquer dessas condições seja insatisfeita, as *word-bits* referentes à *Arming Logic* são desabilitadas e, conseqüentemente, as funções de proteção são bloqueadas, inibindo a operação do relé (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Baseando-se em uma operação por *loop* de falta (para maiores detalhes, ver Apêndice A), a *Arming Logic* permite que variações nas grandezas incrementais de corrente e tensão ocorram, desde que contidas dentro de uma margem máxima definida em fábrica. Dessa forma, mesmo perante cenários de oscilação de potência e variação da frequência nominal do sistema, as funções de proteção manter-se-ão habilitadas para operar, caso necessário.

A principal razão para apresentar os conceitos referentes à *Arming Logic* está relacionada aos testes executados nesta dissertação quando da utilização de malas de testes tradicionais, visto que, para habilitar essa lógica, os sinais de pré-falta devem ser aplicados por pelo menos 3/4 de segundo (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Caso contrário, o relé efetuará o bloqueio de suas funções de proteção, impossibilitando a análise de desempenho almejada.

### 3.4.2 *Starting Logic*

A *Starting Logic* é uma função de detecção de distúrbios não-direcional aplicada aos elementos de proteção baseados em grandezas incrementais e tem como função primária monitorar continuamente os *loops* de falta associados à proteção em sistemas trifásicos, liberando para

operação aqueles que se encontram sob falta e restringindo os demais. Como função secundária, destaca-se a habilitação das lógicas de proteção somente quando da ocorrência de um distúrbio elétrico que possa vir a ser classificado como um curto-circuito, prevenindo a sobrecarga computacional do dispositivo de proteção quando da ocorrência de variações no ponto de operação do sistema monitorado, a exemplo daquelas observadas no equilíbrio carga-geração que ocorrem continuamente durante a operação dos SEEs reais (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

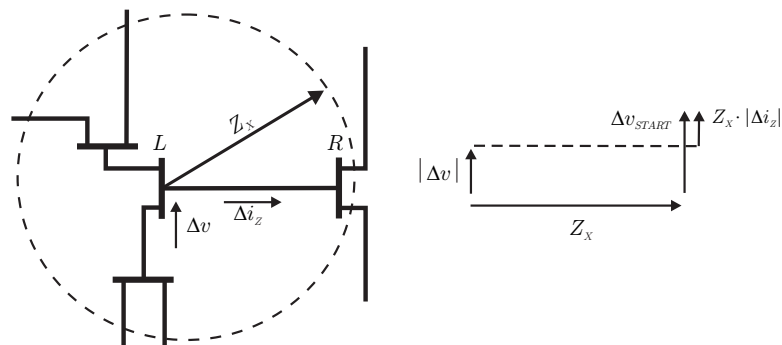
Apresenta-se, na Figura 3.10, o princípio de operação da *Starting Logic*. A partir das grandezas de *loop* de falta monitoradas na barra L da LT protegida, estima-se uma tensão de operação denominada  $\Delta v_{START}$ , conforme demonstrado a seguir:

$$\Delta v_{START} = |\Delta v| + Z_X \cdot |\Delta i_Z|, \quad (3.2)$$

onde  $Z_X$  representa a magnitude da impedância de sequência positiva da LT mais uma margem.

Quando a *Arming Logic* tem suas condições satisfeitas, habilitando o funcionamento das funções auxiliares e de proteção do relé, a *Starting Logic* declara que um dado *loop* encontra-se sob falta quando  $\Delta v_{START}$  excede um limiar estabelecido em fábrica. Neste contexto, o monitoramento de cada *loop* de falta ocorre individualmente, sendo representado por *word-bits* específicas cujas nomenclaturas resultam da concatenação das iniciais de cada *loop* com a *string FLT* (*AGFLT*, *BGFLT*, ...). Além da liberação individual de cada *loop* de falta, o início do distúrbio é marcado temporalmente pela habilitação da *word-bit START*, a qual é habilitada quando qualquer uma das unidades de medição satisfaz a *Starting Logic*, mantendo-se, dessa forma, por um ciclo fundamental, período durante o qual as grandezas incrementais calculadas

**Figura 3.10:** Princípio de operação da *Starting Logic*.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

se mantêm válidas.

O relé SEL-T400L libera a operação das funções de proteção baseadas em grandezas incrementais somente quando o distúrbio é detectado, ou seja, no instante em que o *bit START* é habilitado. Transcorrido o período em que as grandezas incrementais obtidas se mantêm válidas, a *Arming Logic* é desabilitada durante um período de *time-out* de, aproximadamente, 100 ms (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), o qual é necessário para que o relé adquira novos regimes permanentes para as tensões e correntes, os quais serão tomados como referência durante a derivação das novas grandezas incrementais calculadas após o distúrbio. Assim, evita-se que decisões quanto à atuação do dispositivo de proteção sejam tomadas erroneamente, garantindo a segurança e confiabilidade do equipamento.

### 3.4.3 *Traveling Wave (TW) Disturbance Detector*

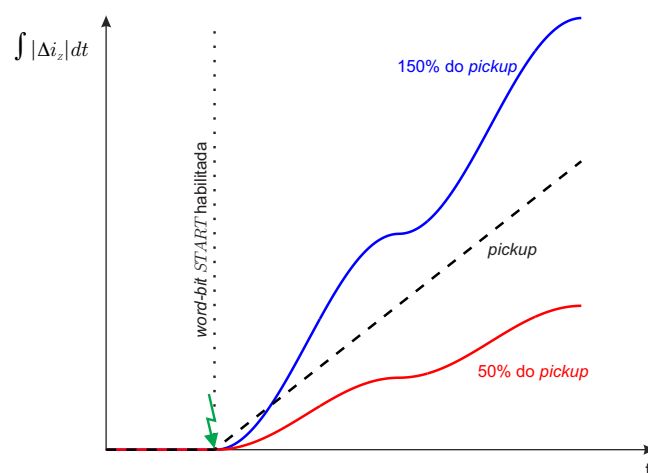
A detecção de distúrbio para os elementos de proteção baseados em ondas viajantes é desempenhada pela função *TW Disturbance Detector*, a qual é responsável por marcar temporalmente a transição de um regime de pré-falta para um regime de falta. A lógica consiste em comparar a soma dos módulos das ondas viajantes por fase, tanto para as tensões quanto para as correntes, com um limiar que se adapta à intensidade do ruído elétrico presente nesses sinais. Assim sendo, quando a soma dos módulos das OV's excede o referido limiar, detecta-se o distúrbio, habilitando, portanto, a *word-bit TWDD* (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

### 3.4.4 **Supervisão por Sobrecorrente**

A operação das funções de proteção embarcadas no T400L baseia-se na análise de transitórios eletromagnéticos oriundos de distúrbios na linha monitorada. Conforme apresentado anteriormente, um vasto espectro de frequências é processado pelo dispositivo, mostrando-se sensível para os distúrbios mais comuns associados à operação de LTs. Como relé de proteção, o T400L deve ser capaz de diferenciar os eventos que colocam a integridade física do equipamento monitorado em risco, a exemplo dos curtos-circuitos. Portanto, visando distinguir as perturbações de baixa energia daquelas de alta energia, ou seja, diferenciar os chaveamentos

das faltas, é necessário monitorar o incremento de corrente provocado pelo distúrbio incidente. Para tanto, o relé avaliado possui uma lógica de supervisão por sobrecorrente cujo princípio de operação é apresentado na Figura 3.11.

**Figura 3.11:** Princípio de operação da supervisão por sobrecorrente do T400L.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

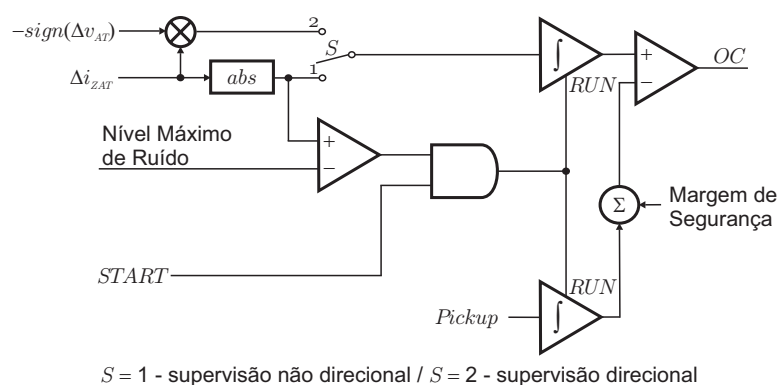
Sabe-se que, anteriormente à ocorrência de uma perturbação, a corrente réplica incremental é idealmente nula e imune à componente CC de decaimento exponencial. Assim, para sinais com essas características, observa-se que a integral do seu módulo possui característica linear cuja inclinação é proporcional à magnitude da corrente observada (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). O elemento de sobrecorrente embarcado no T400L compara a integral do módulo das correntes réplica incrementais de *loop* com a integral da corrente de *pickup*, a qual é determinada a partir de estudos de curto-circuito na linha monitorada. Dessa forma, o distúrbio incidente é classificado como um curto-circuito quando a integral da corrente réplica incremental associada ao *loop* sob falta excede a integral da corrente de *pickup*, conforme ilustrado na Figura 3.11 para um caso em que a magnitude da corrente réplica supera em 50% o valor de *pickup*. Caso contrário, o evento incidente é relacionado a um estado normal de operação da linha.

Cada uma das funções de proteção e/ou esquemas de teleproteção possui elementos de sobrecorrente próprios, a saber: *OCTP*, *OC21* e *OC87*, os quais são referentes ao *POTT*, a *TD21* e a *TW87*, respectivamente. Enquanto que *OCTP* e *OC21* são elementos direcionais de sobrecorrente, *OC87* é não-direcional. Neste contexto, as correntes de *pickup* referentes aos elementos *OCTP* e *OC87* são obtidas a partir de estudos de curtos-circuitos realizados pelo usuário do equipamento, ao passo que, para a *OC21*, é determinada internamente ao dispositivo

de proteção a partir dos ajustes de alcance e impedância da linha (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Apresenta-se, na Figura 3.12, a lógica de supervisão por sobrecorrente simplificada para o *loop* de falta AT embarcada no T400L. Sabe-se que a direcionalidade de distúrbios elétricos pode ser determinada a partir da diferença de polaridade existente entre os sinais de corrente e tensão monitorados. Para um defeito direto, observa-se que tais sinais possuem polaridades contrárias, enquanto que, para defeitos reversos, apresentam mesma polaridade (Schweitzer *et al.*, 2014a). Dessa forma, a supervisão por sobrecorrente direcional integra o produto entre o módulo da corrente réplica incremental e o negativo da polaridade observada para a grandeza incremental de tensão para o *loop* de falta analisado. Por consequência, integra-se positivamente para distúrbios diretos. Tão logo detectado o distúrbio e possuindo medições confiáveis de corrente, a lógica habilita os integradores das correntes réplica e *pickup*, declarando a existência de falta na linha quando a integral da magnitude da corrente réplica supera a integral do *pickup* mais uma margem de segurança. A mesma lógica é aplicada à supervisão não-direcional, modificando-se apenas a posição da chave *S*, e aos demais *loops* de falta (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

**Figura 3.12:** Lógica de supervisão por sobrecorrente simplificada referente ao *loop* AT.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

# AS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO T400L

Apresentam-se neste capítulo os fundamentos teóricos e a programação lógica das funções de proteção baseadas no domínio do tempo embarcadas no T400L. Neste contexto, ao longo do capítulo, apresentar-se-á primeiramente o princípio de funcionamento de cada função seguido da respectiva diagramação lógica.

### 4.1 *TIME-DOMAIN* 32 — TD32

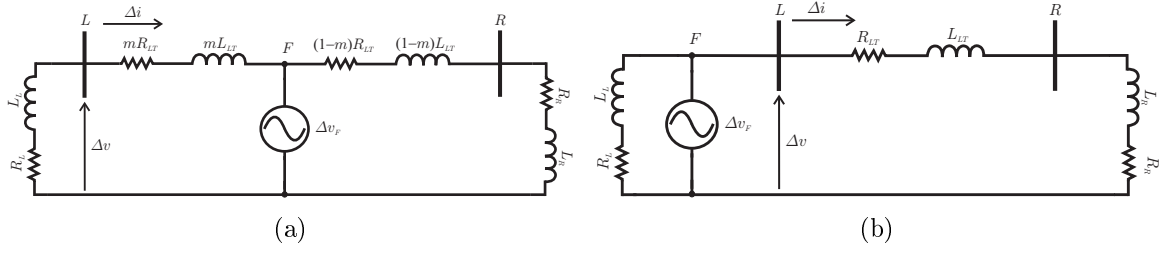
A função direcional de potência (código ANSI 32) aplicada no domínio do tempo é denominada pela SEL como *Time Domain* 32, ou simplesmente, TD32. De forma análoga aos elementos direcionais tradicionais, essa função baseia-se na diferença de polaridade entre tensões e correntes incrementais para determinar a direcionalidade do defeito. Portanto, quando elementos direcionais de sobrealcance são combinados em um esquema de teleproteção *POTT*, garante-se proteção unitária à linha a partir do momento em que ambos os elementos identificam falta direta ao terminal monitorado.

#### 4.1.1 Princípio de Operação

Visando apresentar o princípio de operação da TD32, ilustra-se na Figura 4.1 o circuito puro de falta para um sistema de transmissão monofásico. Por questões de simplificação, modela-se esse sistema a partir de um circuito RL a parâmetros concentrados, em que as impedâncias dos equivalentes de Thévenin representam os sistemas circunvizinhos à LT monitorada. Ressalta-se que a representação RL do sistema é válida, visto que as grandezas incrementais utilizadas pelas funções TD são filtradas de tal forma a minimizar o efeito capacitivo da linha (Schweitzer *et al.*, 2015). Como resultado, relações algébricas simplificadas entre tensões e correntes incrementais podem ser obtidas.



**Figura 4.1:** Circuito puro de falta e as relações entre tensão e corrente incrementais para: (a) Falta direta; (b) Falta Reversa.



**Fonte:** Autoria própria.

Considerando que relés direcionais de potência sejam aplicados a ambos os terminais da linha apresentada na Figura 4.1 e assumindo as referências dos transformadores para instrumentos, para uma falta direta à barra L, tensão e corrente incrementais são relacionadas a partir de:

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

A expressão (4.1) pode ser simplificada, sem perda de generalidade, por meio de sua normalização pela impedância do equivalente de Thévenin associado à barra L, resultando em:

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

onde  $Z_L$  representa a impedância do equivalente de Thévenin associado à barra L e  $\Delta i_Z$  é a corrente réplica incremental, cujos detalhes são apresentados no Apêndice A.

De forma análoga, procede-se com a análise para uma falta reversa à barra L, conforme apresentado na Figura 4.1. Portanto, obtêm-se as seguintes relações entre tensão e corrente réplica incrementais:

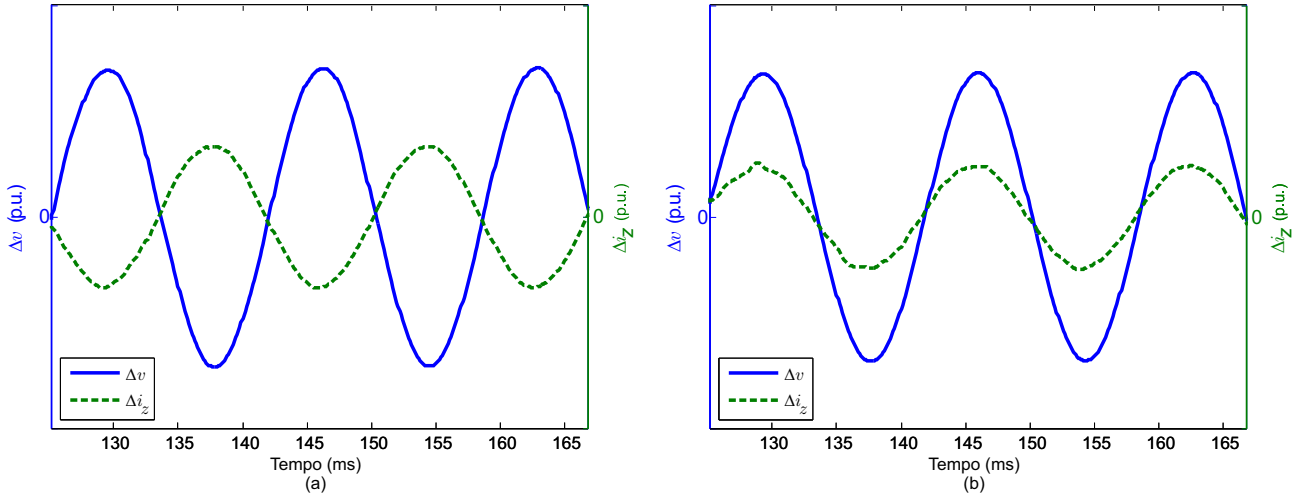
$$\Delta v = |Z_{LT} + Z_R| \cdot \Delta i_Z, \quad (4.3)$$

em que  $Z_{LT}$  e  $Z_R$  representam as impedâncias da linha monitorada e do equivalente de Thévenin associado à barra R, respectivamente.

Nota-se que a partir das relações algébricas simplificadas obtidas entre tensão e corrente incrementais, possibilitadas a partir da utilização de  $\Delta i_Z$ , faltas diretas e reversas podem ser identificadas por meio da análise de polaridade entre as grandezas incrementais de corrente e tensão, conforme demonstrado na Figura 4.2.

Tradicionalmente, funções direcionais de potência aplicadas no domínio do tempo utilizam o produto entre tensões e correntes incrementais para definir um torque de operação, a partir

**Figura 4.2:** Polaridade entre tensão e corrente réplica incrementais observada para faltas: (a) diretas; (b) reversas.



Fonte: Autoria própria.

do qual se identifica a direcionalidade dos distúrbios incidentes à barra monitorada. Diferentemente, a TD32 define um torque de operação ( $T_{OP}$ ) como sendo o negativo do produto entre tensão e corrente réplica incrementais, conforme definido em (4.4), cujo negativo tomado permite se obter grandezas de operação positivas para distúrbios diretos. Portanto, utilizando-se de trajetórias descritas por  $T_{OP} = -\Delta v \cdot \Delta i$  em um plano de operação  $\Delta v$  vs  $\Delta i$ , é possível identificar somente durante os primeiros instantes de curto-circuito, a direcionalidade da falta com precisão, conforme ilustrado na Figura 4.3. Por outro lado, a TD32 utiliza de trajetórias por  $T_{OP} = -\Delta v \cdot \Delta i_Z$  em um plano operacional  $\Delta v$  vs  $\Delta i_Z$ . Como resultado, as trajetórias descritas são estreitadas e a função direcional indica de forma precisa, considerando-se uma margem de segurança (MS), a direcionalidade da falta durante toda a duração do curto-circuito, conforme evidenciado também na Figura 4.3. As melhorias obtidas resultam da eliminação da componente CC de decaimento exponencial por  $\Delta i_Z$ .

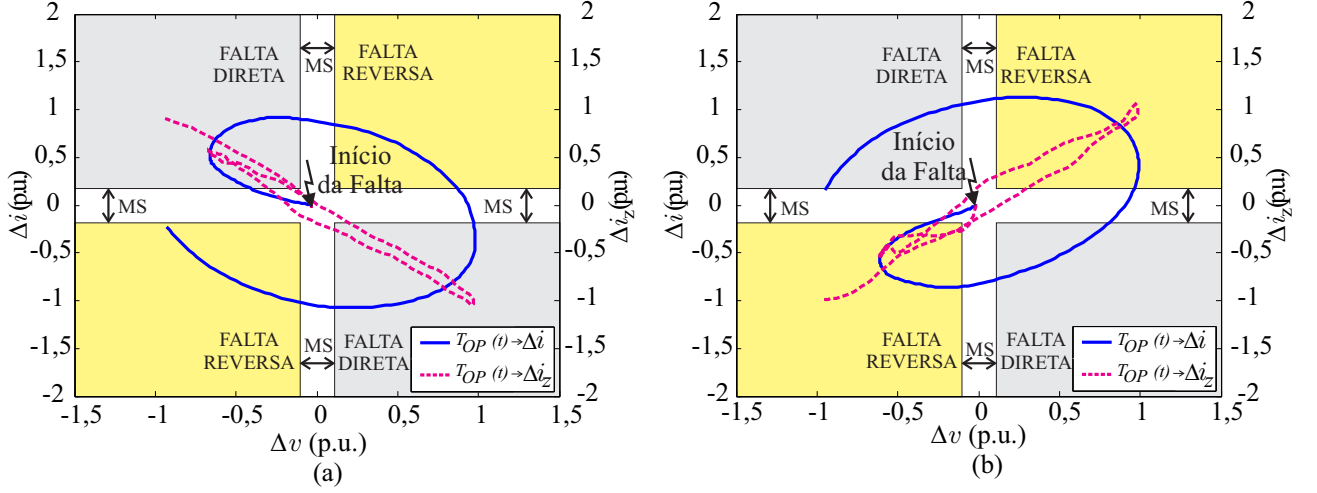
Utilizando-se das relações entre tensão e corrente réplica incrementais mencionadas anteriormente, define-se para a TD32 um torque de operação como sendo o negativo do produto entre  $\Delta v$  e  $\Delta i_Z$ :

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

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

Visando obter o valor de  $T_{OP}$  esperado quando da incidência de faltas diretas e reservas ao

**Figura 4.3:** Trajetórias descritas no plano de operação incremental quando  $T_{OP}$  é obtido a partir do produto entre o negativo da tensão incremental e: (a) corrente incremental e réplica incremental para faltas diretas; (b) corrente incremental e réplica incremental para faltas reversas.



**Fonte:** Autoria própria.

terminal monitorado da linha, pode-se substituir as relações apresentadas em (4.2) e (4.3) na equação que define o torque de operação. Assim sendo, obtêm-se:

$$T_{OP}(t) = \begin{cases} |Z_L| \cdot \Delta i_Z^2(t) & \text{para faltas diretas,} \\ -|Z_{LT} + Z_R| \cdot \Delta i_Z^2(t) & \text{para faltas reversas.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Conforme demonstrado em (4.5), é possível obter um elemento direcional capaz de identificar a direcionalidade do distúrbio. De fato, idealmente, para identificar faltas diretas ou reversas, bastaria realizar uma simples comparação do torque de operação com o valor zero. Contudo, devido às distorções que podem existir nos sinais de tensão e corrente em SEEs reais, tal avaliação não é confiável. Desse modo, visando garantir indicações seguras à função TD32, a direcionalidade do defeito é determinada a partir da comparação entre  $T_{OP}$  e limiares de restrição adaptativos ( $T_{FWD}$  e  $T_{REV}$ ), os quais são definidos em (4.6) e representam uma parcela do torque de operação esperado para distúrbios diretos e reversos, respectivamente.

$$T_{FWD}(t) = TD32ZF \cdot \Delta i_Z^2(t), \quad (4.6a)$$

$$T_{REV}(t) = -TD32ZR \cdot \Delta i_Z^2(t), \quad (4.6b)$$

onde  $TD32ZF$  e  $TD32ZR$  são impedâncias de ajuste do T400L definidas como uma parcela da impedância vista pelo relé para faltas diretas e reversas, respectivamente. Nos próximos capítulos, maiores detalhes serão fornecidos a respeito desses ajustes.

Assim, a função TD32 declara falta direta quando:

$$T_{OP}(t) > T_{FWD}(t). \quad (4.7)$$

e falta reversa quando:

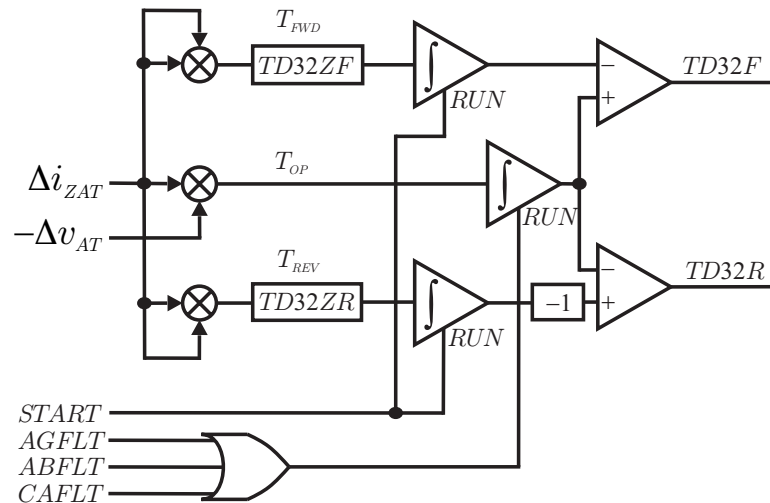
$$T_{OP}(t) < T_{REV}(t). \quad (4.8)$$

Caso nenhuma das condições apresentadas em (4.7) e (4.8) sejam satisfeitas, assume-se que o SEE está operando em condições normais.

#### 4.1.2 Diagrama Lógico da TD32

Apresenta-se na Figura 4.4 a lógica simplificada de operação da TD32 referente ao *loop* de falta AT. Sabe-se que para cobertura de todos os tipos de faltas possíveis nos sistemas elétricos trifásicos, é necessário utilizar o conceito dos *loops* de falta, conforme apresentado no Apêndice A. Neste contexto, a operação da TD32 é baseada na análise de grandezas de *loop*, para as quais a função possui lógica de operação similar à apresentada na Figura 4.4.

**Figura 4.4:** Diagrama lógico simplificado da TD32 para o *loop* de falta AT.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Os torques de operação e seus respectivos limiares adaptativos representam a potência instantânea que trafega pelo terminal monitorado da linha. Conforme apresentado por Glover *et al.* (2012), essa potência varia com o dobro da frequência dos sinais de corrente e tensão a partir dos quais é obtida. Visando obter indicações seguras e precisas, a TD32 integra os

torques de restrição e de operação, obtendo-se, portanto, energias. O controle do integrador dos limiares adaptativos é determinado tão logo iniciado o distúrbio, representado pela ativação da *word-bit START*, enquanto que a integração do torque de operação é obtida quando quaisquer das grandezas de *loop* associadas às fases com falta satisfaçam à *Starting Logic*.

A partir da comparação entre as grandezas integradas de operação e restrição, determina-se que o distúrbio incidente encontra-se a frente do terminal de referência quando a operação excede a restrição para faltas diretas, ativando-se, portanto, a *word-bit TD32F*. Além disso, distúrbios reversos são sinalizados pela mudança lógica no estado da *word-bit TD32R* quando o torque de operação integrado é menor do que a respectiva grandeza de restrição também integrada.

É importante ressaltar que, antes do processo de integração realizado, a lógica da TD32 adiciona aos torques de restrição  $T_{FWD}$  e  $T_{REV}$  um valor de *offset* fixo visando cobrir os cenários em que desequilíbrios elétricos e variações de frequência possam gerar grandezas incrementais espúrias (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), garantindo assim indicações seguras perante casos típicos de operação dos SEEs reais. Conforme mencionado, a TD32 baseia-se em operação por *loop* de falta. Dessa forma, para faltas diretas, a função habilita a variável  $TD32F\phi$ , em que  $\phi = A, B$  e  $C$ , se a fase correspondente está envolvida no defeito. De forma análoga ocorre para os distúrbios reversos a partir de indicações na variável  $TD32R$ .

## 4.2 *TIME-DOMAIN* 21 — TD21

A *Time-Domain* 21, ou simplesmente, TD21 é uma função de distância subalcançada instantânea que utiliza dados de apenas um terminal da linha para emitir comandos de *trip*. Portanto, pode ser aplicada em um esquema de proteção *stand alone*, no qual se elimina a necessidade de canais de comunicação, bem como no esquema de teleproteção *DTT* (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), quando instalados em ambos os terminais da LT elementos de distância.

### 4.2.1 Princípio de Operação

Diferentemente das funções de distância tradicionais, a TD21 não tem seu princípio de operação baseado na estimação de impedância, mas sim na análise do perfil de tensão da linha. Para tanto, tensões de operação e restrição são estimadas e comparadas no alcance da proteção. Desse modo, identifica-se falta na zona de proteção quando a tensão de operação é superior à de restrição (Schweitzer *et al.*, 2015).

Sabe-se que a maior variação de tensão ao longo de uma linha de transmissão ocorre quando da incidência de curtos-circuitos francos (resistência de falta nula), para os quais a tensão varia da tensão de pré-falta a zero. Assim, no alcance  $m_0$  da proteção, utilizando-se das medições de corrente e tensão no terminal monitorado da LT, pode-se estimar a tensão de pré-falta conforme apresentado a seguir:

$$V_{PRE}(t) = v - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot i_Z, \quad (4.9)$$

onde  $Z_{LT}$  é a impedância de sequência positiva da linha e  $i_Z$  é a corrente réplica de pré-falta.

A tensão de operação ( $V_{21OP}$ ) da TD21 é obtida a partir do circuito puro de falta e visa representar a variação de tensão observada no alcance da proteção quando da ocorrência de uma falta. Portanto,  $V_{21OP}$  é definido como:

$$V_{21OP}(t) = V_{PRE}(t) - V_{PRE}(t - T) = \Delta v - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot \Delta i_Z, \quad (4.10)$$

em que  $T$  representa o período fundamental.

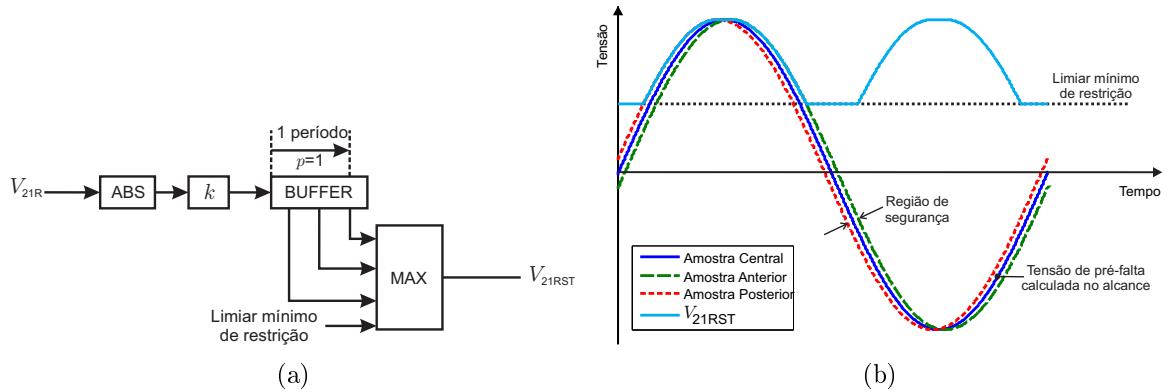
Sabendo que a máxima variação de tensão que pode ocorrer, quando da incidência de um curto-circuito na linha, é a tensão de pré-falta, a TD21 considera como tensão de restrição ( $V_{21R}$ ) a tensão  $V_{PRE}$  atrasada em um ciclo fundamental em relação ao instante atual. Assim, obtém-se:

$$V_{21R}(t) = V_{PRE}(t - T). \quad (4.11)$$

Apresenta-se, na Figura 4.5, o princípio de operação da TD21. Para faltas internas à zona de proteção, observa-se que a tensão de operação excede a tensão de restrição, enquanto que para faltas externas a essa zona, a tensão de restrição é mais elevada que a de operação. Dessa forma, pode-se definir um elemento de distância subalcançado instantâneo a partir da comparação entre tensões de operação e restrição.



**Figura 4.6:** Tensão de restrição da TD21: (a) diagrama de blocos para o cálculo de  $V_{21RST}$ ; (b) tensão obtida.

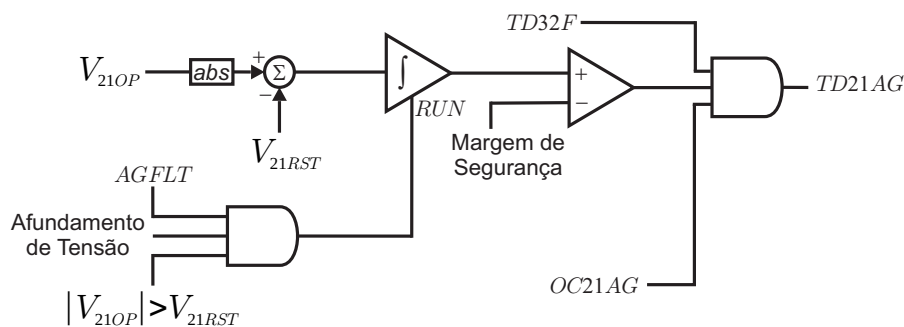


**Fonte:** Adaptada de Schweitzer *et al.* (2015).

Apresenta-se, na Figura 4.6, o diagrama de blocos funcional empregado 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 confiabilidade, aplica-se um fator de segurança  $k$ , o qual geralmente é pouco maior do que a unidade (Schweitzer *et al.*, 2015). Em sequência, utilizam-se os valores de  $V_{21R}$  coletados um ciclo fundamental atrasados, cuja amostra é denominada amostra central. Em relação a essa, obtêm-se amostras adiantadas e também atrasadas. Portanto, a partir do valor máximo resultante da comparação entre esse conjunto de 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 ilustrado na Figura 4.6. Como consequência, obtêm-se um elemento de restrição seguro para diferentes condições de falta, em qualquer instante de tempo, sem perda de segurança para a função TD21. Adicionalmente, para as aplicações com compensação série externa ao terminal oposto ao qual se encontra a TD21, a curva de restrição utilizada não possui um caráter variável, mas sim uma característica *flat*, a qual é obtida a partir da tensão nominal de pico do sistema somada a uma margem de segurança (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Obtidas as variáveis de operação e restrição, define-se a lógica de operação da TD21, conforme demonstrado na Figura 4.7 para o *loop* de falta AT. Basicamente, quando ativo, o integrador promove a integração da diferença entre o valor absoluto de  $V_{21OP}$  e  $V_{21RST}$ , resultando em um valor de tensão integrado. Para que o integrador seja ativado, as seguintes condições devem ser observadas: o *loop* de falta sob análise deve satisfazer a *Starting Logic*; em termos



**Figura 4.7:** Lógica de operação simplificada da TD21 para o *loop* de falta AT.

**Fonte:** Adaptada de Schweitzer *et al.* (2015).

absolutos, a tensão de operação tem que ser maior que a de restrição; e afundamento de tensão deve ser observado no alcance da proteção, característica típica às fases com falta. Quando a tensão integrada superar uma margem de segurança, a TD32 detectar distúrbio direto e observada sobrecorrente no *loop* de falta analisado, a *word-bit*  $TD21AG$  que indica a atuação da proteção é habilitada. De forma análoga, essa lógica é empregada aos demais *loops* de falta.

Por fim, a operação da função é sintetizada em duas variáveis digitais, a saber:  $TD21G$  e  $TD21P$ , as quais indicam que algum dos *loops* monofásicos e bifásicos, respectivamente, encontram-se sob falta. Adicionalmente, ressalta-se que o valor de *pickup* do elemento de sobrecorrente que monitora a TD21 é obtido internamente ao T400L a partir de um valor mínimo de tensão, da impedância de sequência positiva da linha e do alcance da zona de proteção, não sendo necessários estudos de curto-circuito para determiná-lo (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

### 4.3 TRAVELING WAVE 87 — TW87

A função TW87 é um elemento diferencial de linha que utiliza somente as ondas viajantes de corrente para determinar se o distúrbio incidente é interno ou externo à LT monitorada. Para tanto, utilizando-se de um canal de comunicação dedicado para sincronismo de amostras entre ambos os relés instalados nos terminais da LT, comparam-se magnitude, polaridade e tempo de propagação de OV. Consequentemente, viabiliza-se a distinção entre faltas internas e externas.

### 4.3.1 Princípio de Operação

Assim como as funções diferenciais tradicionais, a TW87 tem seu princípio de operação baseado na Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC). Assumindo a LT monitorada como o nó analisado e adotando como positivas as correntes que entram nos terminais da linha (seguindo as polaridades dos TCs), percebe-se que a OV de corrente ( $i_{TW}$ ) lançada no ponto de falta  $F$  é captada na barra L com polaridade contrária àquela que incide na barra R para faltas externas, conforme ilustrado na Figura 4.8. Assume-se para esse cenário uma mesma velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas para ambas as linhas 1 e 2, o que se mostra razoável uma vez que os parâmetros de LTs aéreas são semelhantes por nível de tensão (Glover *et al.*, 2012).

Alinhando-se os instantes de chegada das primeiras  $i_{TW}$  em cada terminal e assumindo uma LT sem perdas, verifica-se, para uma falta externa, a seguinte relação:

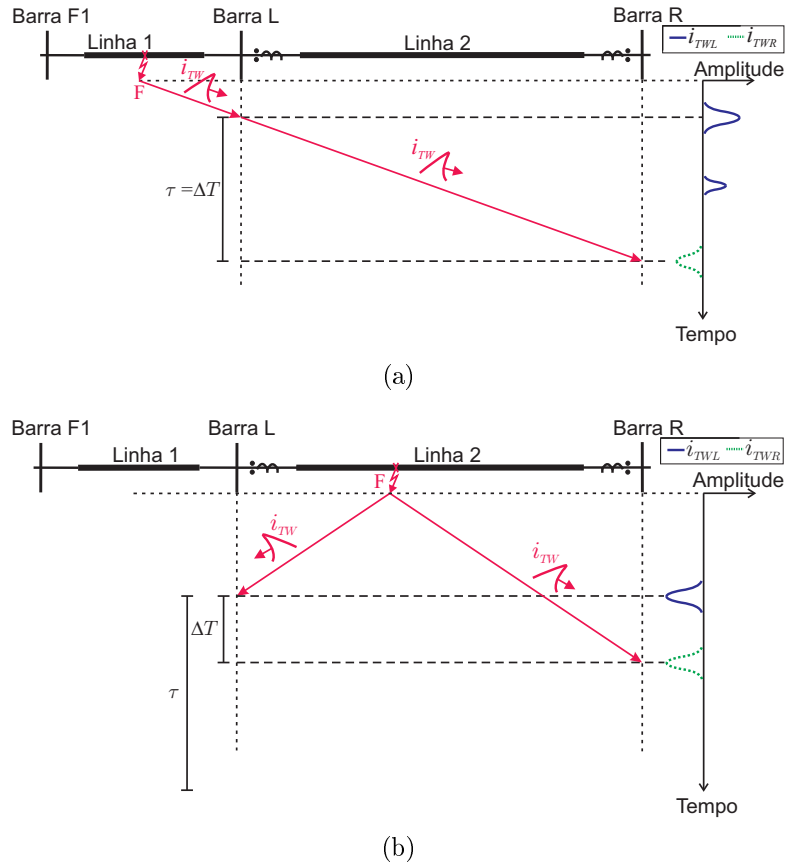
$$i_{TWL} + i_{TWR} = 0, \quad (4.14)$$

onde  $i_{TWL}$  e  $i_{TWR}$  representam as OVs de corrente que alcançam os terminais local e remoto da LT, respectivamente.

Conforme apresentado em (4.14), nota-se que a LKC é satisfeita, ou seja, para uma falta externa à linha, as correntes que entram em um terminal saem no oposto. Por outro lado, para os cenários de faltas internas, verifica-se que as OVs de corrente que incidem em ambos os terminais da linha apresentam a mesma polaridade, conforme ilustrado na Figura 4.8. Dessa forma, utilizando-se a LKC, observa-se:

$$i_{TWL} + i_{TWR} \neq 0. \quad (4.15)$$

Além das diferenças de polaridades existentes para as OVs de corrente quando da ocorrência de faltas internas ou externas à linha, observa-se também que as primeiras  $i_{TW}$  incidentes distam no tempo por um período  $\Delta T$  que se iguala ao tempo de propagação  $\tau$  da LT quando da ocorrência de eventos externos. Por outro lado, para faltas internas,  $\Delta T < \tau$ , conforme apresentado na Figura 4.8. Portanto, o princípio de operação da TW87 constitui-se a partir da comparação entre grandezas de operação e restrição que contabilizam as informações de amplitude, polaridade e tempos de propagação da OVs incidentes nos terminais da LT (SEL-

**Figura 4.8:** Princípio de operação da TW87 para falta: (a) externa; (b) interna.**Fonte:** Autoria própria.

T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Conforme exposto, para faltas externas, as primeiras OV's de corrente incidentes nos terminais da LT encontram-se com polaridades contrárias. Neste contexto, a TW87 contabiliza duas variáveis de restrição,  $i_{RTL}$  e  $i_{RTR}$ , as quais associam-se às faltas externas relacionadas a cada um dos terminais da linha:  $i_{RTL}$  representa os casos de faltas externas em que a OV de corrente entra no terminal local e sai pelo terminal remoto da linha monitorada, enquanto que  $i_{RTR}$  se associa às faltas externas em que  $i_{TW}$  entra no terminal remoto e sai no local. A partir da diferença entre as primeiras ondas incidentes espaçadas no tempo pelo tempo de propagação da linha, obtêm-se sinais de restrição que crescem para faltas externas e decrescem para as internas:

$$i_{RTL}(t) = |i_{TWL}(t - \tau) - i_{TWR}(t)|, \quad (4.16a)$$

$$i_{RTR}(t) = |i_{TWR}(t - \tau) - i_{TWL}(t)|. \quad (4.16b)$$

A TW87 utiliza como sinal de restrição ( $i_{RT}$ ) a maior das variáveis de restrição associadas aos terminais da LT:

$$i_{RT}(t) = \max(i_{RTL}(t), i_{RTR}(t)), \quad (4.17)$$

onde  $\max$  representa a função máximo.

Por outro lado, visando considerar os cenários relacionados às faltas internas, o sinal de operação ( $i_{OP}$ ) é obtida a partir da soma das primeiras OV's de corrente incidentes em ambos os terminais da linha. Assim, obtém-se uma grandeza que cresce para faltas internas e decresce para as externas:

$$i_{OP}(t) = i_{TWL}(t \pm \Delta T) + i_{TWR}(t). \quad (4.18)$$

Considerando-se uma linha sem perdas, nota-se que, para faltas externas, a grandeza de restrição resultante se aproxima ao dobro do valor de pico associado à OV incidente, enquanto que a variável de operação tende a zero. Todavia, observa-se o oposto para as faltas internas, ou seja,  $i_{OP} \gg i_{RT}$ . Perante o exposto, a TW87 identifica falta interna à linha protegida quando:

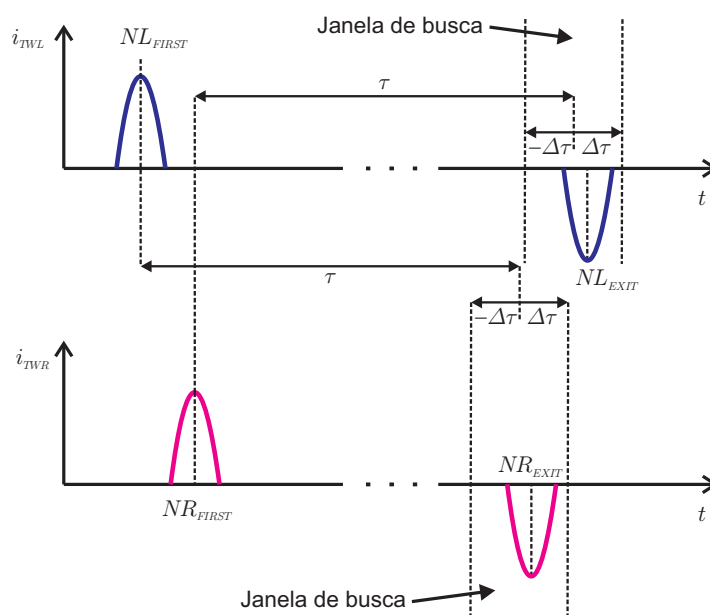
$$|i_{OP}| > S \cdot i_{RT}, \quad (4.19)$$

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

### 4.3.2 Diagrama Lógico da TW87

Além do princípio de operação básico apresentado anteriormente, os desenvolvedores das funções de proteção aplicadas no domínio do tempo primam pela segurança dos elementos obtidos. Neste contexto, camadas adicionais de segurança são aplicadas à lógica de operação final da TW87. A identificação dos instantes de chegada e saída de OV's nos terminais da linha constitui-se como a etapa desencadeadora das condições de segurança relacionadas à função diferencial. Nesse sentido, primeiramente, identificam-se os instantes de chegada das primeiras OV's de corrente incidentes em cada um dos terminais da linha, os quais, numericamente, são representados em número de amostras resultando nas estimativas  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$  para os terminais local e remoto, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 4.9.

Em posse dos índices  $NL_{FIRST}$  e  $NR_{FIRST}$ , janelas de busca nos terminais opostos aos de

**Figura 4.9:** Definindo os instantes de chegada e saída das OV's de corrente na LT monitorada.

Fonte: Adaptada de Schweitzer *et al.* (2015).

referência são estabelecidas, as quais são centradas em um instante  $\tau$  segundos após a detecção das primeiras OV's incidentes no terminal de referência. O objetivo é determinar o índice da amostra associado ao instante de saída da OV, resultando, portanto, nas estimativas  $NL_{EXIT}$  e  $NR_{EXIT}$  para os terminais local e remoto, respectivamente. 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 podem ser provenientes de incertezas nos parâmetros elétricos e físicos da linha monitorada.

Identificados os instantes de chegada e saída das OV's em cada terminal da linha, pode-se obter os parâmetros cruciais de operação e restrição da TW87, a saber:  $IL$ ,  $IR$ ,  $IOP$ ,  $IRT$ ,  $VPOL$  e  $TW87FL$  (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Sabe-se que devido ao vasto espectro de frequências monitorado pela TW87, essa função assume um caráter de elevada sensibilidade perante os transitórios eletromagnéticos decorrentes de defeitos no sistema monitorado e em sua circunvizinhança. Neste contexto, uma primeira etapa de segurança de suma importância para atuações corretas do elemento diferencial é a localização de faltas, a qual visa identificar se de fato o evento que sensibilizou o relé de proteção se encontra na linha monitorada. Para tanto, utiliza-se o algoritmo clássico de localização de

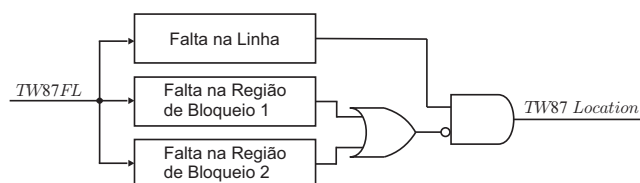
faltas via dois terminais para obter a estimativa do local do defeito ( $TW87FL$ ):

$$TW87FL = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{NL_{FIRST} + NR_{FIRST}}{\tau_{amostras}} \right), \quad (4.20)$$

onde  $\tau_{amostras}$  representa o tempo de propagação da linha em número de amostras.

Apresenta-se, na Figura 4.10, a lógica referente à primeira camada de segurança da TW87. A partir da estimativa do local do defeito ( $TW87FL$ ), habilita-se a *word-bit TW87 Location* somente quando o distúrbio incidente se encontra na linha e fora das regiões de bloqueio existentes no relé, as quais visam restringir a operação do relé para faltas ocorridas no ramal de derivação em LTs com *tap*, por exemplo.

**Figura 4.10:** Lógica da TW87 referente ao processamento da localização de faltas.

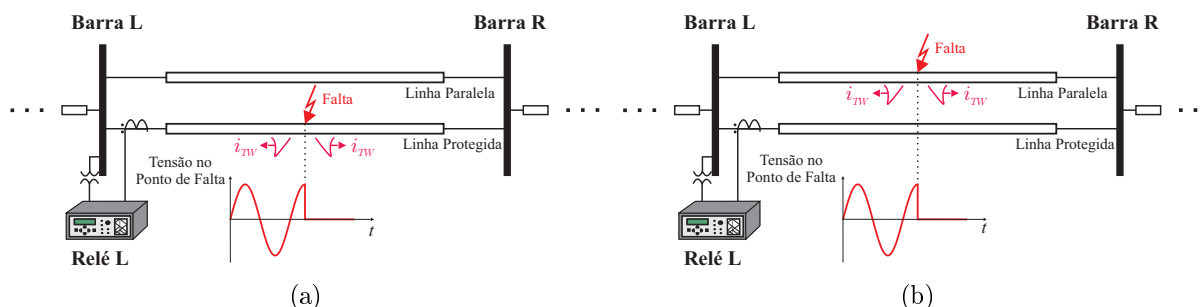


**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Os grandes sistemas de transmissão de energia elétrica, a exemplo do SIN, são configurados de forma a possuir redundância operacional. Assim, almeja-se reduzir a ocorrência de grandes blecautes. Neste contexto, as diversas LTs operando em paralelo possuem papel primordial. Todavia, impõem desafios à operação dos relés de proteção que as monitoram, visto que o acoplamento magnético entre as linhas é expressivo.

A TW87 possui uma lógica de estimação de uma tensão de polarização ( $V_{POL}$ ), que constitui uma segunda camada de segurança aplicada às faltas externas em LTs paralelas. Basicamente, o objetivo é verificar se a polaridade referente às primeiras OV incidentes nos terminais da LT é consistente com a polaridade da tensão de pré-falta no local do defeito (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Para uma falta incidente na linha monitorada ocorrendo no semiciclo positivo da tensão, o afundamento de tensão resultante provoca o lançamento de OV de corrente com polaridade negativa que se propagam em direção aos terminais da LT, conforme apresentado na Figura 4.11. Entretanto, devido à polaridade dos TCs adotada, tais OV são medidas como positivas. Portanto, constata-se a mesma polaridade para a tensão de pré-falta e a OV de corrente medida no terminal. De forma análoga ocorre para faltas iniciadas

**Figura 4.11:** A relação entre a tensão de pré-falta e as OV's de corrente lançadas no ponto de defeito para falta franca na linha: (a) protegida; (b) paralela.

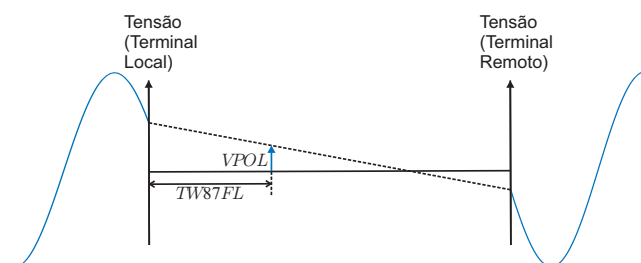


**Fonte:** Autoria própria.

no semiciclo negativo da tensão. Todavia, para defeitos ocorridos em linhas paralelas, o padrão de polaridade observado inverte (vide Figura 4.11), ou seja, as OV's de corrente medidas e a tensão de pré-falta possuem polaridades contrárias, situação essa que deve resultar no bloqueio da função.

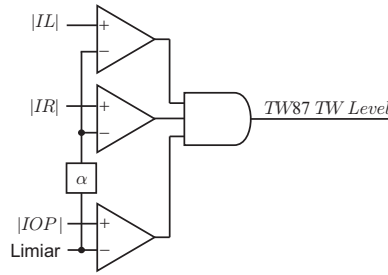
Perante o exposto, apresenta-se na Figura 4.12 a forma como a TW87 estima a tensão de pré-falta no local do defeito. Sabe-se que o perfil de tensão ao longo de linhas de transmissão é aproximadamente linear, visto que uma prática comum à operação dos SEEs é a regulação das tensões terminais das LTs de tal forma a reduzir a queda de tensão associada (Glover *et al.*, 2012). Assim, em posse das tensões nos terminais da linha para o instante de tempo imediatamente anterior à ocorrência do distúrbio bem como de  $TW87FL$ , estima-se a tensão de pré-falta no ponto de falta, ou seja,  $V_{POL}$  (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

**Figura 4.12:** Obtenção da tensão de polarização.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Outra importante condição de segurança consiste em estimar as magnitudes referentes às primeiras OV's incidentes nos terminais local e remoto por meio das grandezas  $IL$  e  $IR$ , respectivamente. Dessa forma, garante-se que a proteção será sensibilizada somente quando da

**Figura 4.13:** Lógica da TW87 referente à magnitude das OV's incidentes.

**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

ocorrência de transitórios eletromagnéticos com energia relevante, evitando indicações decorrentes de OV's que possuam origem duvidosa, as quais podem ser resultantes de chaveamentos no sistema, por exemplo. Neste contexto,  $IL$  e  $IR$  são calculadas conforme apresentado a seguir:

$$IL = C \cdot \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL}(NL_{FIRST} - k), \quad (4.21a)$$

$$IR = C \cdot \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR}(NR_{FIRST} - k), \quad (4.21b)$$

onde  $M$  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 assim a informação de amplitude das OV's medidas, sendo  $N_{DS}$  o número de coeficientes do filtro DS.

A grandeza de operação é denominada na TW87 de  $IOP$  e, numericamente, é calculada conforme apresentado a seguir:

$$IOP = C \cdot \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL}(NL_{FIRST} - k) + i_{TWR}(NR_{FIRST} - k), \quad (4.22)$$

em que  $M$  e  $C$  são definidos da mesma forma que para o cálculo de  $IL$  e  $IR$ .

Estimadas as magnitudes das OV's de corrente que incidem os terminais da LT monitorada, constitui-se na TW87 uma lógica que afere se os níveis das correntes incidentes são confiáveis para tomada de decisões corretas pela função, conforme apresentado na Figura 4.13. Ressalta-se que o valor de limiar utilizado é obtido a partir da precisão do conversor A/D utilizado no T400L, o qual determina o nível de confiabilidade das medições realizadas, e  $\alpha$  possui valor sugerido de aproximadamente 0,2 (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Numericamente, as correntes de restrição associadas a cada um dos terminais da linha ( $i_{RTL}$



e  $i_{RTR}$ ) e, conseqüentemente, a variável de restrição da TW87,  $IRT$ , são obtidas a partir de:

$$IRTL = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWL}(NL_{FIRST} - k) - i_{TWR}(NR_{EXIT} - k) \right|, \quad (4.23a)$$

$$IRTR = C \cdot \left| \sum_{k=-M}^{k=M} i_{TWR}(NR_{FIRST} - k) - i_{TWL}(NL_{EXIT} - k) \right|, \quad (4.23b)$$

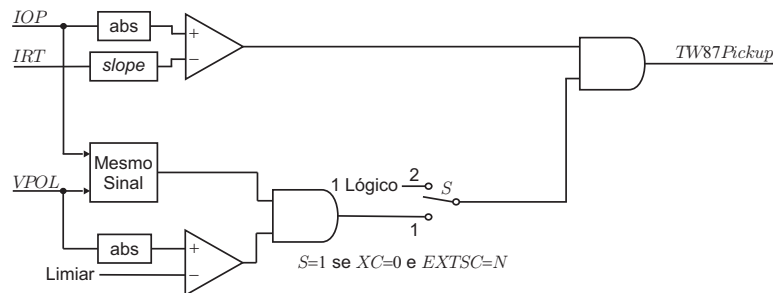
$$IRT = \max(IRTL, IRTR), \quad (4.23c)$$

onde  $C$  e  $M$  são obtidos conforme mencionado anteriormente.

Obtidas as variáveis de operação e restrição da TW87, bem como estimada a tensão de pré-falta no local do defeito, define-se a lógica de restrição da função, conforme ilustrado na Figura 4.14. Basicamente, para que a operação da função seja habilitada, o que é indicado por meio da *word-bit*  $TW87Pickup$ , duas condições essenciais precisam ser satisfeitas:  $|IOP| > slope \cdot IRT$ , condição característica às funções diferenciais; e tensão de pré-falta e grandeza de operação possuem polaridades iguais. Assim sendo, mesmo perante cenários de faltas externas em linhas paralelas, a operação da TW87 pode ser restringida corretamente. Contudo, não somente essas condições são conferidas pela função diferencial. Sabe-se que OV's consideravelmente atenuadas ou até mesmo inexistentes são observadas quando da ocorrência de faltas iniciadas próximas ao cruzamento da tensão pelo zero (Schweitzer *et al.*, 2014b). Perante tais cenários, o que é contabilizado pela magnitude de  $VPOL$ , bloqueia-se a função, visto que medições confiáveis de corrente não são obtidas.

Por fim, sabendo que as variáveis  $XC$  e  $EXTSC$  indicam, respectivamente, o valor da impedância referente à compensação série interna e se há compensação série no terminal oposto ao do relé parametrizado (caracterizando-se que os sistemas adjacentes ou até mesmo as linhas em paralelo são compensadas), ressalta-se que a lógica da tensão de polarização somente é

**Figura 4.14:** Lógica de restrição da TW87.

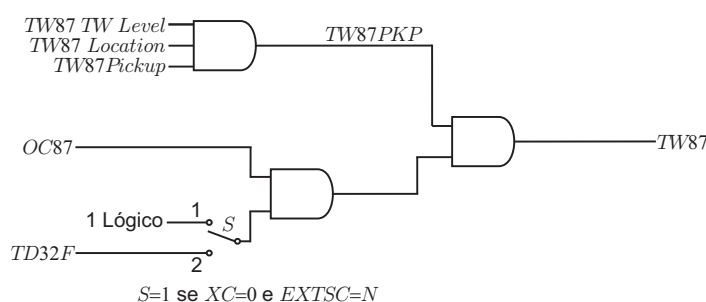


**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

válida quando não há compensação série interna ( $XC = 0$ ) ou externa ( $EXTSC = N$ ) à linha monitorada (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), o que é representado pela posição da chave  $S$ .

Ilustra-se na Figura 4.15 a lógica de operação da TW87. Satisfeitas todas as condições mencionadas anteriormente ( $TW87\ TW\ Level$ ,  $TW87\ Location$  e  $TW87\ Pickup$ ), habilita-se por 1/4 de ciclo a *word-bit*  $TW87PKP$ , informando-se que um potencial curto-circuito ocorre na linha. Dessa forma, aguarda-se a indicação do elemento de supervisão por sobrecorrente associado à TW87 —  $OC87$  — para confirmar a natureza do distúrbio incidente, distinguindo-se, portanto, eventos de baixa e alta quantidade energética. Desse modo, chaveamentos de banco de capacitores ou de reatores na linha podem ser diferenciados de faltas, por exemplo. Adicionalmente, para os cenários de linhas com compensação série interna ou externa, a TD32F passa a supervisionar a função diferencial em ambos os terminais da linha. Essa supervisão direcional é crucial para manter a segurança nas atuações da TW87 mesmo perante cenários de faltas externas ocorridas em linhas paralelas, visto que para tais a lógica associada à tensão de polarização é inválida (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Satisfeitas todas as condições que indicam falta interna à linha monitorada, habilita-se a *word-bit* que indica a operação da função diferencial —  $TW87$ .

**Figura 4.15:** Lógica de operação simplificada da TW87.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

É importante ressaltar que a atuação segregada por fase é obtida a partir da utilização de *loops* de falta. Assim sendo, o *loop* sob falta é selecionado a partir da componente alfa ou beta de Clarke que retorna a maior grandeza de operação. Por consequência,  $IL$ ,  $IR$ ,  $IOP$  e  $IRT$ , em todas as lógicas apresentadas, são referentes ao *loop* sob falta (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

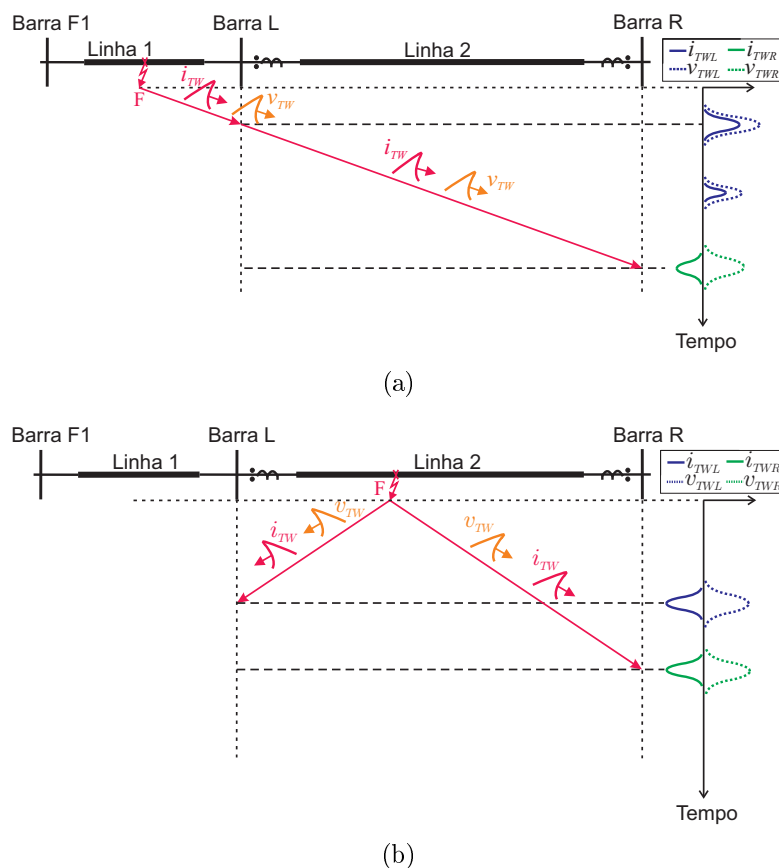
## 4.4 TRAVELING WAVE 32 — TW32

A *Traveling Wave 32*, ou simplesmente TW32, é uma função direcional de potência baseada no princípio de ondas viajantes, sendo livre de ajustes. Monitorando as primeiras ondas incidentes de corrente e tensão nos terminais da linha, pode-se determinar precisamente a direcionalidade do defeito. Devido à faixa espectral em que se encontram as bases operacionais da TW32, suas indicações ocorrem em poucas centenas de microssegundos. Neste contexto, o relé T400L utiliza essa função direcional com o intuito de acelerar o envio de permissivo no esquema de teleproteção *POTT*. Assim, pode-se dizer que a TW32 não garante o *trip*, mas apenas acelera a atuação final do esquema e, conseqüentemente, também a do dispositivo de proteção (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

### 4.4.1 Princípio de Operação

Assim como a TD32, a TW32 utiliza da diferença de polaridade entre as tensões e correntes medidas quando da ocorrência de defeitos diretos ou reversos ao terminal monitorado da LT. Entretanto, na TW32, são as polaridades das OV's que são utilizadas para identificação da direcionalidade do distúrbio, as quais são extraídas dos sinais de corrente e tensão medidos a partir do filtro DS, sendo, em sequência, comparadas para fins de atuação da TW32.

Considerando uma falta externa iniciando-se no semiciclo negativo da tensão, percebe-se que OV's de tensão e corrente com polaridades positivas são lançadas no ponto de falta, propagando-se em direção aos terminais da linha monitorada, conforme apresentado na Figura 4.16. Devido à polaridade dos TC's empregados na linha, correntes entrando nos terminais dessa são consideradas positivas. Já para as medições de tensão, geralmente, a depender do nível de tensão da linha, utilizam-se Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs), para os quais, a referência considerada para as medições realizadas é a terra. Portanto, as OV's de tensão medidas mantêm a polaridade com a qual iniciaram sua propagação. Perante o exposto, para faltas reversas ao terminal tomado como referência para a análise (barra L), observa-se que as OV's de tensão e corrente medidas possuem a mesma polaridade. Todavia, para o terminal mais distante do ponto de falta, a corrente percorre a linha no sentido de deixá-la. Assim, para esse terminal (barra R), verifica-se que as OV's de corrente e tensão alcançam o terminal com polaridades

**Figura 4.16:** Princípio de operação da TW32 para: (a) falta externa; (b) falta interna.

**Fonte:** Autoria própria.

contrárias, caracterizando-se um cenário de distúrbio a frente do terminal.

Diferentemente, para as faltas internas à linha, assumindo o mesmo ângulo de incidência considerado anteriormente, ou seja, faltas iniciando-se no semiciclo negativo da tensão, observa-se que, devido à polaridade dos TCs de linha empregados, as OV's de tensão e corrente medidas em ambos os terminais monitorados possuem polaridades contrárias, conforme ilustrado na Figura 4.16, mostrando-se que ambos identificam faltas diretas. Neste contexto, percebe-se que o simples cruzamento de informações entre os relés direcionais empregados em ambos os terminais da linha seria suficiente para determinar se o distúrbio incidente é interno ou externo à mesma, visto que a partir da diferença de polaridade entre as OV's de tensão e corrente possibilita-se a identificação da direcionalidade do defeito.

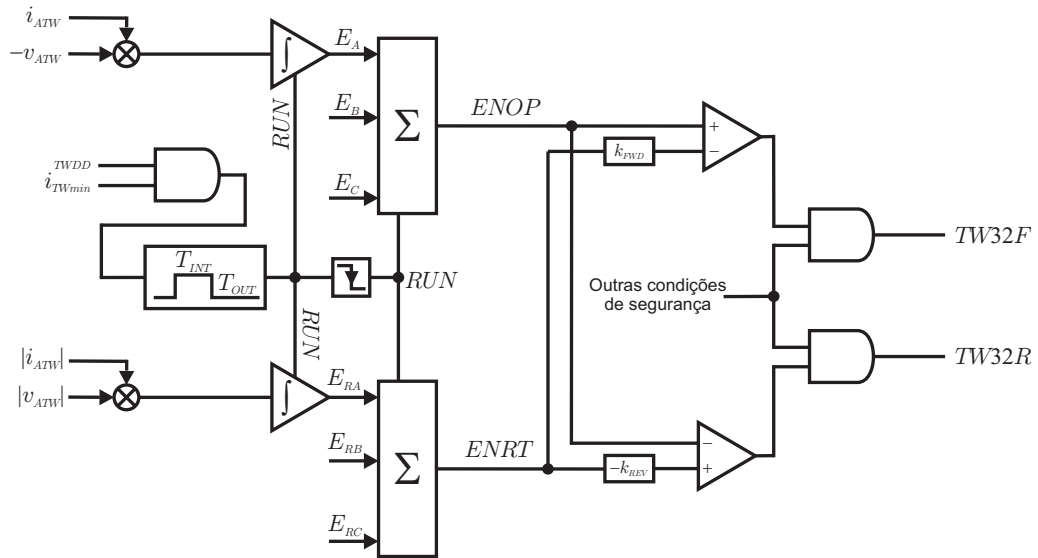
Visando responder somente às primeiras ondas incidentes nos terminais da LT monitorada, a TW32 analisa a saída do filtro DS por algumas dezenas de microssegundos, bloqueando a função ao final desse período. Por consequência, minimizam-se os efeitos negativos que as sucessivas

reflexões de ondas viajantes no ponto de falta e nas linhas adjacentes à monitorada podem impor à TW32, a exemplo de indicações incorretas da direcionalidade do distúrbio incidente (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

#### 4.4.2 Diagrama Lógico da TW32

Apresenta-se na Figura 4.17 a lógica de operação simplificada da TW32 implementada no T400L, a qual se baseia em uma execução por fase. Diferentemente das demais aplicações no T400L que utilizam da teoria de OV, as OV de corrente e tensão empregadas na TW32 são extraídas utilizando uma janela de  $100 \mu s$  no filtro DS. Dessa modo, almeja-se responder às primeiras OV incidentes, visto que se estende a base triangular do formato característico às ondas extraídas via filtro DS e, conseqüentemente, minimizam-se os efeitos referentes às reflexões subsequentes à primeira onda incidente. Além disso, o tamanho da janela de dados empregada na extração das OV influencia diretamente no ganho aplicado à frequência fundamental do sistema, o qual é diretamente proporcional à duração da janela utilizada. Portanto, visando manter a sensibilidade da função bem como atenuar as componentes de baixa frequência, tal como a fundamental, à saída do filtro DS aplica-se um filtro passa-altas, cujas características são mantidas em sigilo de fábrica. Adicionalmente, com o intuito de manter a resiliência da função perante ruídos elétricos, retira-se a componente de modo zero das OV extraídas por fase, obtendo-se as OV de tensão e corrente utilizadas pela TW32, conforme ilustrado na Figura 4.17 para a fase A —  $v_{ATW}$  e  $i_{ATW}$ . Assim o fazendo, a TW32 responde às componentes de modo alfa presente nos sinais de corrente e tensão processados (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

Extraídas as OV de interesse, a TW32 calcula um torque de operação definido a partir do produto entre o negativo da OV de tensão e a OV de corrente,  $-v_{ATW}$  e  $i_{ATW}$ , respectivamente. Dessa forma, torques de operação positivos são observados para distúrbios diretos e negativos, para os reversos. O torque obtido é integrado por um período de  $T_{INT}$  segundos, o qual se equivale à metade da janela de dados utilizadas para a extração das OV de interesse à TW32. Ressalta-se que o integrador somente é ativo quando o detector de distúrbios por ondas viajantes é satisfeito (*word-bit TWDD* encontra-se ativa) e a corrente em qualquer uma das fases excede um limiar mínimo, o que é indicado pela variável  $i_{TWmin}$ .

**Figura 4.17:** Lógica de operação simplificada da TW32 para a fase A.

**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Finalizado o período de integração, obtêm-se, para cada fase, energias ( $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$ ) e, por aproximadamente  $T_{OUT}$  segundos, bloqueia-se o integrador, com o intuito de evitar atuações referentes às OV's refletidas bem como as não relacionadas à falta. Em sequência, detectada a transição do período de integração para o de bloqueio, obtêm-se a energia de operação da função,  $ENOP$ , a qual é resultado da soma das energias por fase, ou seja,  $ENOP = E_A + E_B + E_C$ . De forma análoga ocorre para a energia de restrição  $ENRT$ , a qual é fruto da soma entre energias obtidas a partir de um torque de operação resultante do produto entre o absoluto das OV's de tensão e corrente ( $ENRT = E_{RA} + E_{RB} + E_{RC}$ ).

A partir da habilitação da *word-bit*  $TW32F$ , a TW32 indica distúrbios diretos quando  $ENOP > k_{FWD} \cdot ENRT$ , em que o valor sugerido para  $k_{FWD}$  é 0,75 (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), e outras condições de segurança são satisfeitas. De forma similar, habilita-se a *word-bit*  $TW32R$ , quando  $ENOP < -k_{REV} \cdot ENRT$ , em que o valor sugerido para  $k_{REV}$  é 0,5 (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019), indicando portanto a presença de distúrbio reverso.

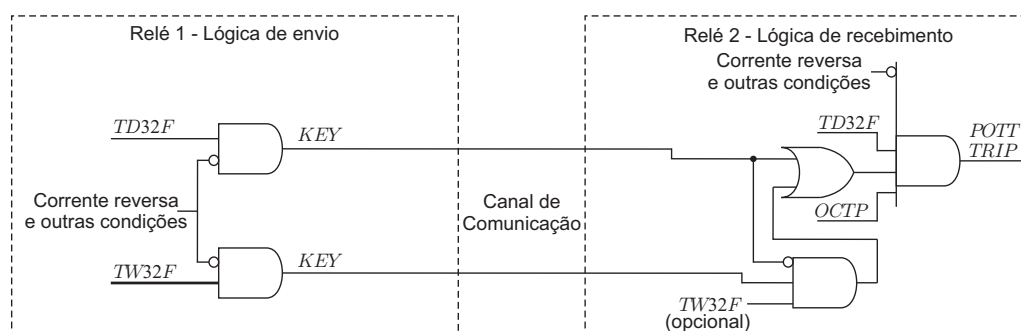
Assim como as demais funções de proteção desenvolvidas e embarcadas no T400L, a TW32 prima pela segurança. Desse modo, para que qualquer uma de suas *word-bits* de operação sejam habilitadas, diversas condições de segurança precisam ser satisfeitas. Dentre elas, destacam-se: as OV's de tensão e corrente capturadas precisam exceder um valor de limiar mínimo, bem como

a energia de operação resultante; de forma análoga à TW87, estima-se a tensão de polarização para analisar a consistência entre a polaridade dessa e a OV de corrente incidente; entre outras (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

### 4.4.3 Esquema de Teleproteção *POTT*

Conforme mencionado ao longo desse capítulo, as funções direcionais de potência constituem-se elementos de sobrealcance que quando combinadas em um esquema de teleproteção *POTT* garantem a proteção unitária da linha monitorada. Neste contexto, apresenta-se, na Figura 4.18, a lógica de *POTT* simplificada referente ao T400L, a qual compõe-se de duas lógicas, a saber: a de envio e a de recebimento, as quais, tipicamente, encontram-se em dispositivos de proteção distintos (relés 1 e 2). Diferentemente dos esquemas de teleproteção *POTT* tradicionais, aquele referente ao T400L é resultado da aplicação de dois elementos direcionais cujos princípios de operação são distintos. A partir das respostas intrinsecamente mais rápidas devido a sua natureza de operação, a TW32 possibilita ao esquema atuações mais rápidas. Diz-se, portanto, que essa função é responsável por acelerar o envio de permissivo, o qual é indicado pela habilitação da *word-bit KEY*.

**Figura 4.18:** Lógica simplificada de *POTT* do T400L.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

Basicamente, o envio de permissivo ocorre quando quaisquer das funções direcionais detectam distúrbios a frente do terminal monitorado da linha e não é satisfeita a lógica de corrente reversa e outras condições de segurança. Utilizando-se dos elementos de sobrecorrente direcionais, permite-se identificar correntes reversas. Neste contexto, a lógica referente a tais correntes visa prover segurança ao esquema *POTT* perante os cenários de eliminação de defeitos em li-

nhas paralelas. Por se basearem em componentes operacionais distintas e devido à influência da resposta transitória dos TPCs sobre a TW32, ambas as funções direcionais podem possuir indicações distintas a depender da natureza do distúrbio incidente (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Como consequência, bits separados são utilizados para cada uma das funções direcionais durante o envio do sinal permissivo de *trip*.

Após a chegada do sinal permissivo no relé de proteção aplicado ao outro terminal da linha, inicia-se a lógica de recebimento referente ao esquema de teleproteção. Percebe-se que o permissivo recebido só garantirá o *trip* da linha quando confirmado, a partir da TD32, que o distúrbio é interno à linha monitorada, bem como é associado a um curto-circuito (a partir das indicações do elemento de sobrecorrente que monitora o *POTT — OCTP*). Adicionalmente, a lógica de corrente reversa não deve indicar falta em linha paralela. Satisfeitas simultaneamente todas as condições supracitadas, a atuação do esquema é sinalizada pela *word-bit POTT TRIP*. Perante a lógica apresentada, percebe-se que a TW32 não é utilizada para garantir a atuação do esquema de teleproteção e, sim, para apenas acelerá-lo (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).



## CAPÍTULO 5

# AJUSTES, METODOLOGIA DE TESTES E SISTEMAS ANALISADOS

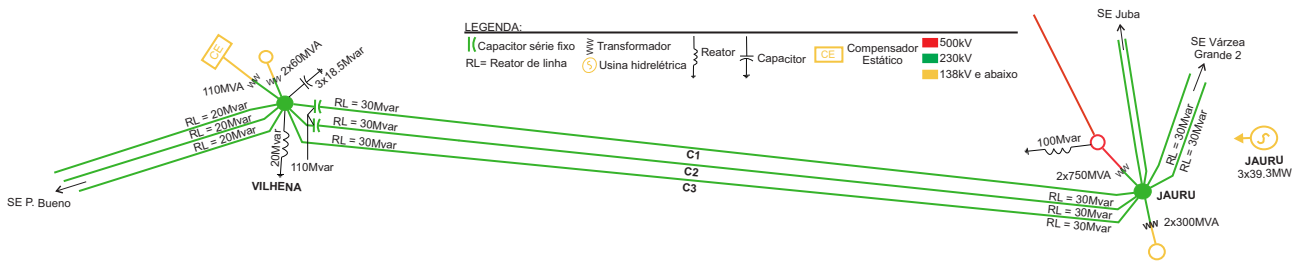
Neste capítulo, serão apresentados os ajustes requeridos para o correto funcionamento das funções de proteção avaliadas, os sistemas de potência analisados e a metodologia empregada no equipamento para viabilizar a análise de resultados. Inicialmente, apresenta-se com uma breve contextualização sobre os sistemas de potência utilizados durante os testes, passando em seguida para a descrição das metodologias de testes empregadas e, por fim, a descrição dos ajustes relacionados ao relé SEL-T400L.

### 5.1 SISTEMAS DE POTÊNCIA AVALIADOS NOS TESTES

Com o intuito de ilustrar o desempenho das funções de proteção avaliadas, sistemas reais e simulados foram utilizados. Inicialmente, apresentam-se dois sistemas de transmissão reais do SIN. Em seguida, apresenta-se um sistema simulado a partir do qual parâmetros importantes de operação da rede elétrica são controlados e variados com o intuito de demonstrar o desempenho do equipamento para condições específicas de funcionamento da rede, possibilitando identificar as principais limitações e vantagens relacionadas à aplicação do T400L nos SEEs.

#### 5.1.1 Sistema Real 1 (SR1)

Apresenta-se, na Figura 5.1, um sistema de transmissão real do SIN, localizado na região norte, operando em 230 kV/60 Hz. Trata-se de um sistema composto por três circuitos de transmissão, com extensão aproximada de 343 km cada, operando em paralelo, que interligam as subestações Jauru (JAU) e Vilhena (VIL). Destaca-se a presença de componentes elétricos importantes para operação sistêmica da rede interligada nacional, a saber: compensadores *shunt* e série, fixos e estáticos, geradores, etc. Portanto, trata-se de um sistema cuja complexidade

**Figura 5.1:** Sistema Real 1: circuito 3 de transmissão entre a SE Jauru e a SE Vilhena.

**Fonte:** Autoria própria.

impõe desafios à operação dos dispositivos de proteção reais.

Segundo dados da ANEEL (2018), entre o período de 01/06/2016 a 30/06/2017, observaram-se 34 ocorrências de desligamentos forçados referentes ao circuito 3 (C3), o qual é de propriedade da Eletronorte (ELN), importante concessionária de energia do sistema de transmissão brasileiro. Como principal responsável pelos índices de desligamentos apresentados, destacam-se as descargas atmosféricas, que contribuiu com 25 das 34 ocorrências registradas. Enfatiza-se que o número de desligamentos na linha provocados por descargas atmosféricas excede em mais de 200% o limite máximo para causas desse tipo quando consideradas LTs com nível de tensão igual a 230kV (ONS, 2016b).

Com o intuito de prover análise de desempenho do relé SEL-T400L, registros reais de perturbações referentes ao circuito C3 foram considerados, os quais foram disponibilizados pela ELN. Todavia, em decorrência da taxa de amostragem desses registros (15,36 kHz), somente as funções de proteção baseadas em grandezas incrementais puderam ser testadas, visto que, em decorrência do espectro de frequências obtido, inviabiliza-se a reprodução dos transitórios eletromagnéticos nos quais se baseia o princípio de funcionamento das funções TW. Neste contexto, a partir dos parâmetros elétricos disponibilizados pelo ONS (dados dos equivalentes de Thévenin da circunvizinhança do sistema) e pela ELN (demais parâmetros), modelou-se em ATP (*Alternative Transients Program*) o sistema apresentado na Figura 5.1, possibilitando a geração de registros com aproximadamente 16667 amostras/ciclo (1 MHz), o que permitiu avaliar todas as funções de proteção contidas no relé avaliado.

Considerando a linha protegida como aquela associada ao circuito C3, cujos parâmetros elétricos são apresentados na Tabela 5.1, as análises referentes ao SR1 foram divididas em duas partes, a saber: na primeira, analisa-se o desempenho do T400L, quando contabilizadas as

respostas apenas das funções TD, perante casos reais de falta, comparando a resposta desse com a dos relés de proteção tradicionais encarregados de garantir a integridade do C3 atualmente; na segunda, considerando a atuação de todas as funções de proteção disponíveis, o desempenho do relé é obtido a partir do sistema simulado.

**Tabela 5.1:** Parâmetros elétricos referentes à linha C3 do sistema SR1.

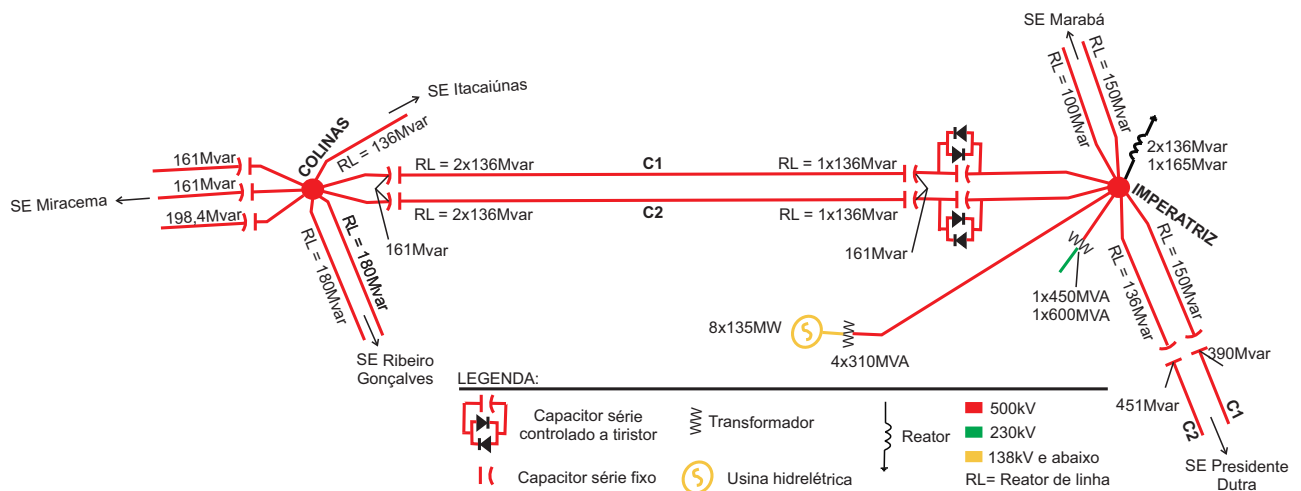
Sequência	$R(\Omega/\text{km})$	$X(\Omega/\text{km})$	$Y(\mu\text{S}/\text{km})$
Zero	0,3713	1,1317	2,9185
Positiva	0,0383	0,2945	5,5289

**Fonte:** Autoria própria.

### 5.1.2 Sistema Real 2 (SR2)

Na Figura 5.2, apresenta-se um sistema de interligação entre os subsistemas norte e sul do SIN. Trata-se de sistema de transmissão operando em 500 kV/60 Hz, composto por dois circuitos (C1 e C2), com extensão de 343 km cada, localizados entre as subestações Colinas (COL) e Imperatriz (IPZ). Neste sistema, enfatiza-se a presença de compensadores série e *shunt*, fixos e estáticos, internos e externos ao sistema analisado. Portanto, constitui-se uma rede elétrica complexa que traz desafios à operação dos relés de proteção reais.

**Figura 5.2:** Sistema Real 2: circuito 2 de transmissão entre as SE Colinas e a SE Imperatriz.



**Fonte:** Autoria própria.

De forma análoga ao SR1, a partir da análise de perturbações disponibilizadas pela ANEEL

(2018), durante o período de 01/06/2016 até 30/06/2017, observaram-se 10 ocorrências de desligamentos forçados referentes ao circuito 2 (C2), sendo o agente de transmissão TAESA o responsável pela operação desse circuito bem como a ELN pelas subestações terminais (ANEEL, 2018). A principal causa para os desligamentos ocorridos é referente às queimadas próximas ou na faixa de servidão das linhas, correspondendo a 6 das 10 ocorrências observadas (ANEEL, 2018). Embora dentro dos limites estabelecidos pelo ONS (2016b), constata-se um cenário desafiador à operação dos dispositivos de proteção, principalmente quando da ocorrência de carbonização de vegetação, visto que para tais cenários observa-se que a resistência de falta varia durante a duração do defeito e possui característica não-linear (Saha *et al.*, 2010).

Devido à indisponibilidade de registros reais associados a esse sistema, as análises referentes ao desempenho do T400L para o SR2 foram obtidas a partir de registros simulados na rede elétrica modelada em ATP. Para geração dos registros, utilizou-se uma taxa de amostragem de 1 MHz (passo de integração de 1  $\mu$ s), resultando em 16667 amostras/ciclo, portanto adequado para avaliação de todas as funções de proteção contidas no relé objeto de estudo. Perante o exposto, considerar-se-á que a linha protegida é aquela associada ao circuito C2, cujos parâmetros elétricos são apresentados na Tabela 5.2, com relés SEL-T400L dispostos em ambos os terminais dessa.

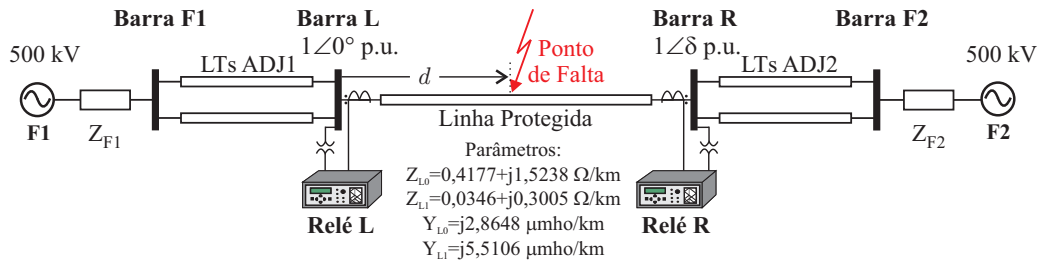
**Tabela 5.2:** Parâmetros elétricos referentes à linha C2 do sistema SR2.

Sequência	$R(\Omega/\text{km})$	$X(\Omega/\text{km})$	$Y(\mu\text{S}/\text{km})$
Zero	0,423	1,357	2,708
Positiva	0,017	0,266	6,086

**Fonte:** Autoria própria.

### 5.1.3 Sistema Simulado 1 (SS1)

Ilustra-se, na Figura 5.3, um sistema modelado e simulado em ATP a partir do qual parâmetros importantes de operação da rede elétrica são controlados e variados com o intuito de demonstrar o desempenho do equipamento para condições específicas de funcionamento da rede. Assim, espera-se identificar as principais limitações e vantagens relacionadas à aplicação do T400L nos sistemas elétricos de potência.

**Figura 5.3:** Sistema Simulado 1.

**Fonte:** Autoria própria.

O sistema simulado 1 (SS1) opera em 500 kV/60 Hz, sendo composto por cinco linhas de transmissão modeladas como perfeitamente transpostas a parâmetros distribuídos e constantes na frequência. A linha protegida, a qual é circundada em cada terminal por duas linhas de transmissão operando em paralelo e que possuem 15 km cada, possui 200 km de extensão e todas as LTs apresentam os parâmetros elétricos conforme indicado na figura. Por outro lado, os equivalentes de Thévenin representam os sistemas circunvizinhos às linhas. Adicionalmente, os transformadores para instrumentos, TPC e TC, foram modelados conforme apresentado em Pajuelo *et al.* (2008) e IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (2004), respectivamente. Essa modelagem se mostra importante, uma vez que TPCs e TCs podem induzir transitórios eletromagnéticos nos sinais medidos, os quais podem afetar o desempenho de dispositivos de proteção.

Com o intuito de verificar o desempenho do T400L para condições específicas de operação da rede elétrica, utilizou-se o SS1 para obter cenários de faltas distintos daqueles promovidos pelos sistemas reais analisados. Casos de falta considerando a influência de transformadores para instrumento, ângulo de incidência de falta ( $\theta$ ), resistência de falta ( $R_F$ ), local do defeito ( $d$ ) e carregamento da linha ( $\delta$ ) foram contabilizados.

As análises referentes a esse sistema podem ser divididas em duas partes: na primeira, a partir de casos pontuais, espera-se apresentar o comportamento das funções para condições específicas de operação da rede, identificando as limitações e vantagens de cada uma delas; na segunda, a partir de simulações em massa, permite-se trazer uma visão geral de atuação de cada uma das funções de proteção contidas no T400L. Para tanto, os parâmetros de operação e de falta da rede elétrica foram variados conforme apresentado a seguir:  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  e  $90^\circ$ ;  $\delta = 5^\circ, 15^\circ$  e  $25^\circ$ ;  $R_F = 0 \Omega, 25 \Omega$  e  $50 \Omega$ ; e  $d$  de 0,1 pu a 0,9 pu em passos de 0,1 pu do

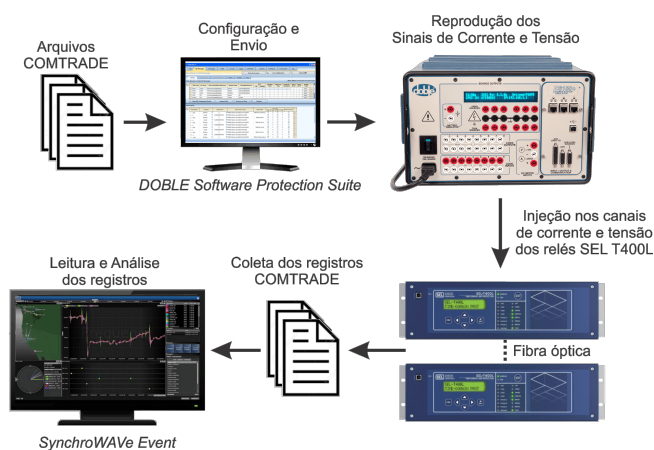
comprimento da linha. Resulta-se em um total de 243 casos de falta para os quais se obteve a análise de desempenho referente ao dispositivo de proteção avaliado.

## 5.2 METODOLOGIA DE TESTE

Com o intuito de viabilizar a análise de desempenho almejada, neste trabalho adotaram-se dois procedimentos de testes distintos, os quais variaram de acordo com a origem dos registros oscilográficos, a saber: simulados ou reais. Para os casos reais de falta, devido à taxa de amostragem dos registros obtidos, o *playback* dos arquivos COMTRADE associados foi realizado por meio de mala de teste real, a qual é capaz de reproduzir os sinais de tensão e corrente contidos nesses arquivos. Por outro lado, para os casos de faltas simuladas, a funcionalidade de *playback* do relé SEL T400L foi a opção escolhida. Trata-se do primeiro dispositivo de proteção de LTs que permite carregar diretamente na memória do relé os registros COMTRADE dos casos para os quais se deseja obter o desempenho do equipamento (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

### 5.2.1 Metodologia de teste aplicada à mala de teste

Apresenta-se, na Figura 5.4, a metodologia de teste empregada em laboratório para obtenção do desempenho do relé SEL T400L em relação aos casos reais de falta. O procedimento consiste em carregar no *software Protection Suite*, de fabricação da *DOBLE*, os registros COMTRADE oriundos dos Registradores de Perturbação (RDP) aplicados em campo. A partir do *protection suite*, são configurados os canais de tensão e corrente utilizados na mala de teste empregada (*DOBLE F6150sv*) e carregados diretamente na memória dessa, via canal de comunicação, os registros COMTRADE do caso a ser analisado. Neste momento, efetua-se a reprodução dos sinais de tensão e corrente diretamente nos canais de potência dos dois relés SEL T400L empregados nos testes realizados, sendo um para cada terminal da linha associada ao sistema teste. Além disso, ambos os dispositivos de proteção se comunicam através de uma fibra ótica cujo atraso de comunicação associado é desprezível, devido às dimensões reduzidas dessa. Finalizada a duração do evento reproduzido e obtida a resposta do T400L, efetua-se a coleta dos registros COMTRADE que contêm as *word-bits* que explicitam o desempenho do equipamento.

**Figura 5.4:** Procedimento de teste laboratorial utilizando mala de teste.

**Fonte:** Autoria própria.

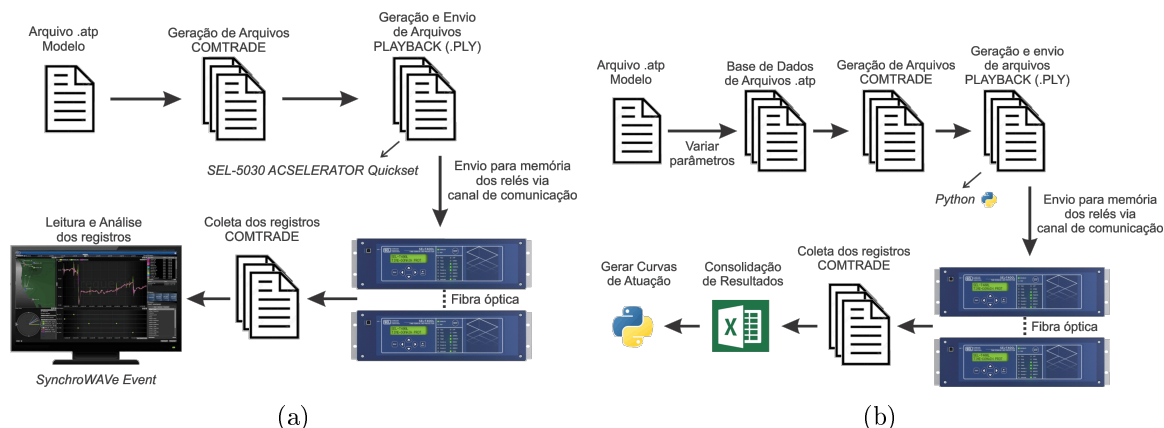
Por fim, para leitura e análise dos registros oscilográficos obtidos bem como para a representação dos resultados, utilizou-se o *software* de domínio SEL denominado *SynchroWAVE Event*.

É importante ressaltar que a metodologia de *playback* desenvolvida pela SEL realiza a conversão de registros COMTRADE para o formato .PLY apenas para arquivos cuja frequência de amostragem seja de 1, 2, 4, 8 e 10 kHz ou 1, 2, 3, 4 e 5 MHz. Portanto, os registros reais referentes ao SR1 não podem ser carregados na memória do relé, visto que o número de amostras por ciclo inviabiliza a geração dos arquivos PLAYBACK, o que justificou a necessidade de utilização de malas de testes para execução dos referidos casos de falta.

### 5.2.2 Metodologia de teste aplicada à funcionalidade de *playback* do T400L

Na figura 5.5, ilustram-se os procedimentos de testes laboratoriais utilizando a funcionalidade de *playback* do T400L para análise de casos pontuais e simulações em massa. A metodologia associada aos casos pontuais inicia-se a partir de um arquivo .atp modelo que contém a modelagem do sistema de potência tomado como referência para análise de desempenho do relé de proteção. Em sequência, o arquivo .pl4 gerado após a execução da simulação dos transitórios eletromagnéticos é convertido para o formato COMTRADE utilizando-se, para tanto, uma ferramenta integrada ao ATP denominada GTPPLOT. Em posse dos arquivos COMTRADE, a partir da plataforma de configuração dos dispositivos de proteção da SEL, denominada *SEL-5030 acSELErator Quickset*, converte-se esses arquivos para o formato PLAYBACK (.PLY), o

**Figura 5.5:** Procedimento de teste laboratorial utilizando a funcionalidade de *playback* do T400L para: (a) casos pontuais; (b) simulações em massa.



**Fonte:** Autoria própria.

qual é composto por arquivos COMTRADE no padrão IEEE 2013 e variáveis chaves referentes ao agendamento e sincronismo do teste a ser inicializado. Ao término da conversão, efetua-se o carregamento do arquivo .PLY associado diretamente na memória do relé e o agendamento do início do teste. Por fim, finalizada a execução do teste corrente, efetua-se a coleta dos registros COMTRADE associados à resposta dos relés bem como a leitura e análise desses por meio do *SynchroWAVE Event*. Destaca-se que a metodologia empregada pela SEL somente pode ser aplicada ao máximo de cinco testes por vez e o tempo mínimo entre o instante em que é realizado o agendamento do teste até a execução de fato desse é de dois minutos, limitando a metodologia para análise de testes em massa.

Devido às limitações associadas à metodologia proposta pela SEL, desenvolveu-se, no Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos (LAPSE), uma ferramenta de teste laboratorial para análise de simulações em massa específica para os relés SEL-T400L, cujo diagrama é apresentado na Figura 5.5. A partir de um arquivo .atp modelo, no qual se encontra a modelagem do SEE de referência, variam-se os parâmetros de operação bem como os de falta de acordo com as análises a serem realizadas por meio de planilha em Excel. Dessa forma, obtém-se uma base de dados de arquivos .atp. Em sequência, compila-se, em um arquivo .BAT, procedimentos automatizados de execução de toda a base de dados, obtendo-se portanto um conjunto de arquivos .pl4 associados, os quais em seguida são convertidos, também de forma automática, em registros COMTRADE. Em sequência, empregando-se a programação em linguagem *python*, efetuam-se a conversão dos registros COMTRADE para .PLY, o envio desses arquivos para a memória do



relé e o agendamento do início dos testes. Utilizando-se de programação paralela, por meio do conceito de *threads*, concomitantemente em ambos os relés são carregados os arquivos .ply em sua memória. Por consequência, possibilita-se reduzir significativamente o tempo necessário para a execução do próximo registro.

Ao término dos testes, inicia-se de forma automática, também via *python*, a coleta dos registros COMTRADE associados à base de dados de teste, a partir dos quais os resultados de atuação de cada uma das funções de proteção bem como da emissão de *trip* pelo relé são consolidados em planilha excel. Por fim, as curvas de atuação são geradas em *python* por meio de bibliotecas próprias para desempenhar tais tarefas. A partir do exposto, possibilita-se a execução de testes em massa sem limitação de registros, bem como a síntese dos resultados de forma otimizada para o operador da metodologia desenvolvida.

### 5.3 AJUSTES DAS FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO T400L

Visando facilitar a inserção comercial do equipamento, os desenvolvedores do dispositivo de proteção avaliado neste trabalho, sabendo da inovação que propuseram ao mercado de proteção de LTs, reduziram de forma significativa, principalmente quando comparados aos relés de proteção tradicionais, a quantidade de ajustes associados à operação de cada uma das funções de proteção e esquemas de teleproteção embarcados, conforme evidenciado no Capítulo 4. Neste contexto, apresenta-se na Tabela 5.3, todos os ajustes associados às funções de proteção bem como aos esquemas de teleproteção do T400L. Ressalta-se que, conforme mencionado ao longo deste trabalho, a TW32 é uma função livre de ajustes. No Apêndice B, apresenta-se um maior detalhamento a respeito dos ajustes e do procedimento de parametrização associados ao relé SEL-T400L.

### 5.4 AJUSTES UTILIZADOS

Apresentam-se, nesta seção, os ajustes obtidos para cada um dos sistemas teste a partir dos quais o T400L teve o seu desempenho analisado. Para tanto, os procedimentos de parametrização apresentados no Apêndice B foram seguidos, obtendo-se os valores contidos na Tabela 5.4,

**Tabela 5.3:** Ajustes associados às funções de proteção do T400L.

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	Valor de <i>pickup</i> associado à 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	Valor de <i>pickup</i> associado à supervisão por sobrecorrente para os loops de falta monofásicos	
POTT	TP67P	Valor de <i>pickup</i> associado à 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 do esquema de teleproteção.
	TP67G	Valor de <i>pickup</i> associado à 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 TD21 e TW87 quando da presença de compensação série interna ou externa à linha protegida.
	EXTSC	Presença ou ausência de compensação série externa à LT	

**Fonte:** Adaptada de (Kasztenny *et al.*, 2016).

os quais se encontram referidos ao secundário do sistema. Neste contexto, quanto aos elementos de sobrecorrente, as configurações forte e fraca dos sistemas reais foram fornecidas pela ONS e ELN, enquanto que para o sistema modelado em ATP, seguiram-se as especificações apresentadas em IEEE Power System Relaying Committee (2000) a respeito do SIR (*Source-to-Impedance*

*Ratio*) do sistema. Além disso, para todos os tipos de curtos-circuitos aplicados, considerou-se um valor de  $R_F$  de  $100 \Omega$  primários. Por fim, encontram-se também representadas as relações de transformação dos TPCs e TCs utilizados, RTP e RTC, respectivamente, bem como os parâmetros de impedância da linha protegida representados na forma polar  $Z1MAG \angle Z1ANG$  e  $Z0MAG \angle Z0ANG$  para as sequências positiva e zero, respectivamente.

**Tabela 5.4:** Ajustes obtidos para cada um dos sistemas teste considerados.

Elemento	Ajuste	Valor do ajuste em		
		Sistema SR1 SE VIL / SE JAU	Sistema SR2 SE COL / SE IPZ	Sistema SS1 Bar. L / Bar. R
TD32	TD32ZF	1,16 / 0,66 $\Omega_{sec}$	0,89 / 0,68 $\Omega_{sec}$	0,33 / 0,33 $\Omega_{sec}$
	TD32ZR	6,12 / 6,12 $\Omega_{sec}$	1,70 / 1,70 $\Omega_{sec}$	3,63 / 3,63 $\Omega_{sec}$
TD21	TD21MP	0,75 / 0,75 pu	0,75 / 0,75 pu	0,75 / 0,75 pu
	TD21MG	0,7 / 0,7 pu	0,7 / 0,7 pu	0,7 / 0,7 pu
TW87	TWLPT	1168,70 / 1168,70 $\mu s$	1157,60 / 1157,60 $\mu s$	682,69 / 682,69 $\mu s$
	TP50P	1,66 / 2,79 $A_{sec}$	2,11 / 3,28 $A_{sec}$	4,08 / 4,08 $A_{sec}$
	TP50G	1,52 / 2,06 $A_{sec}$	1,95 / 3,00 $A_{sec}$	3,83 / 3,83 $A_{sec}$
POTT	TP67P	1,66 / 2,79 $A_{sec}$	10,00 / 10,00 $A_{sec}$	4,08 / 4,08 $A_{sec}$
	TP67G	1,52 / 2,06 $A_{sec}$	7,68 / 7,67 $A_{sec}$	3,83 / 3,83 $A_{sec}$
Geral	XC	0 / 0 $\Omega_{sec}$	12,70 / 12,70 $\Omega_{sec}$	0 / 0 $\Omega_{sec}$
	EXTSC	N / Y <sup>1</sup>	Y / Y	N / N
Sistema	RTP / RTC	2000 / 400	2000 / 400	2000 / 400
	Z1MAG	20,41 $\Omega_{sec}$	18,29 $\Omega_{sec}$	12,10 $\Omega_{sec}$
	Z1ANG	82,58°	86,34°	83,43°
	Z0MAG	81,85 $\Omega_{sec}$	97,51 $\Omega_{sec}$	63,20 $\Omega_{sec}$
	Z0ANG	71,83°	72,69°	74,67°

<sup>1</sup>Para os casos simulados, nos quais o esquema diferencial do T400L será habilitado, o ajuste assume Y / Y.

**Fonte:** Autoria própria.

# ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se a análise dos resultados para cada um dos casos de curtos-circuitos reais bem como simulados, os quais visam trazer uma concepção geral a respeito da complementariedade entre as funções embarcadas no dispositivo bem como ilustrar as principais vantagens e limitações no emprego do T400L para a proteção de linhas de transmissão.

Para cada um dos sistemas testes avaliados, considerou-se sempre que o esquema de teleproteção *POTT*, com a possibilidade de aceleração por parte de TW32, a TD21 e a TW87, para os cenários nos quais a taxa de amostragem dos registros utilizados possibilite a avaliação dessa função, estivessem habilitadas para emitir o comando de *trip* na linha de transmissão monitorada.

A seguir, os resultados apresentados serão separados por sistema teste considerado, a começar pelos casos reais referentes ao SR1. Em seguida, ilustram-se os resultados para o SR2 e para o SS1, o qual permitirá o controle de importantes parâmetros de operação e curto-circuito da rede elétrica visando demonstrar o desempenho do relé para condições específicas de funcionamento desse. Os resultados apresentados foram escolhidos de forma a ilustrar o desempenho de cada uma das funções embarcadas no T400L, bem como a complementação mútua dessas para emitir a decisão final de atuação do dispositivo.

## 6.1 RESULTADOS PARA O SR1

Nesta seção, apresentam-se os resultados de atuação do T400L para o circuito C3 de transmissão disposto entre as subestações Jauru (JAU) e Vilhena (VIL), conforme discutido na Seção 5.1.1. As análises referentes a esse sistema são divididas em duas partes, a saber: na primeira, registros oscilográficos reais são avaliados; na segunda, registros simulados obtidos a partir da modelagem da rede elétrica em ATP são considerados. Devido à taxa de amostragem dos re-

gistros reais (256 amostras/ciclo — 15,36 kHz), apenas o desempenho das funções TD21 e da TD32 foi estudado para um total de oito casos de faltas internas e externas à linha protegida. Por fim, nos registros simulados, a partir da aplicação de uma taxa de amostragem de 1 MHz, possibilita-se avaliar, concomitantemente, todas as funções embarcadas no T400L.

### 6.1.1 Casos reais de falta

Apresentam-se, na Tabela 6.1, os resultados para os casos reais de falta analisados neste trabalho, para os quais as indicações da TD21 estão relacionadas à habilitação das *word-bits* *TD21G* ou *TD21P* enquanto que na TD32 estão relacionadas à *word-bit* *TD32F*. Neste contexto, visando demonstrar os benefícios da aplicação da proteção no domínio do tempo em relação às proteções tradicionais aplicadas no domínio fasorial, ilustra-se também o tempo de atuação dessas, onde PH21 e PH87 representam as respostas das funções fasoriais referentes à primeira zona da proteção de distância e à proteção diferencial, respectivamente, responsáveis, atualmente, por garantir a integridade física da linha monitorada. Para todos os casos, a distância de falta representada foi obtida pelas equipes encarregadas da manutenção da linha, assumindo a subestação (SE) VIL como referência. Durante a apresentação dos resultados obtidos, ilustram-se separadamente as indicações das funções de proteção e de sobrecorrente, com o intuito de esclarecer como ambas se inter-relacionam contribuindo para o tempo de operação final do dispositivo.

Por fim, apresenta-se na Tabela 6.2 o tempo de atuação final do T400L para cada um dos casos de falta analisados considerando a TD21 operando no esquema *stand-alone* bem como estando habilitados os esquemas de teleproteção *POTT* e *DTT*, contabilizando-se, para tanto, o atraso do canal de comunicação associado ao sistema em questão, o qual, baseado em medições de campo, é da ordem de 4 ms. É importante ressaltar que para a contabilização do tempo de atuação de cada uma das funções avaliadas, considerou-se como início do distúrbio o instante de tempo em que esse foi detectado no relé, ou seja, no instante em que a *word-bit* *START* foi habilitada, visto que para casos reais de falta não é conhecido o instante real de início do distúrbio.

Apresentados os resultados, escolhem-se dois deles (R1 e R8) para ilustrar pontualmente

**Tabela 6.1:** Avaliação das funções PH21, PH87, TD21 e TD32 considerando casos reais de falta.

Número do caso	Tipo de Falta/ Localização a partir de VIL (pu)	Tempo op. <sup>1</sup> dos elementos fasoriais (ms)		Tempo op. <sup>1</sup> das funções no tempo (ms)	
		VIL PH21/PH87	JAU PH21/PH87	VIL (TD21/OC21) (TD32/OCTP)	JAU (TD21/OC21) (TD32/OCTP)
R1	Interna BT/0,46	●19,3/●30,0	●19,1/●32,2	(●5,5/●0,8) (●1,6/●1,4)	(●6,5/●0,7) (●2,3/●5,5)
R2	Interna CA/0,46	●25,5/●29,8	●22,3/●28,4	(●9,8/●1,4) (●0,7/●1,4)	(●9,8/●1,3) (●0,7/●1,9)
R3	Interna BT/0,08	●17,0/●27,3	○/●25,2	(●1,9/●0,6) (●0,7/●0,9)	(○/●1,0) (●2,4/●2,0)
R4	Interna CT/0,06	●19,8/●25,1	○/●25,6	(●1,2/●0,4) (●0,7/●0,6)	(○/●0,7) (●0,7/●1,4)
R5	Interna BT/0,63	●24,5/●29,7	●18,4/●28,4	(○/●0,6) (●0,7/●1,0)	(●2,2/●0,6) (●0,7/●1,1)
R6	Interna CT/0,14	●20,0/●26,8	○/●25,5	(●1,2/●0,5) (●0,7/●0,7)	(○/●0,7) (●0,7/●1,4)
R7	Interna BT/0,044	●18,5/●27,8	○/●27,4	(●4,7/●0,6) (●0,7/●0,9)	(○/●1,3) (●1,6/●2,8)
R8	Externa BT	○/○	○/○	(○/○) (○/○)	(○/●1,0) (●0,7/○)

○ = Não operou, ● = Operou, <sup>1</sup>Tempo de Operação.**Fonte:** Autoria própria.

**Tabela 6.2:** Tempo de Operação do T400L considerando habilitados os esquemas de teleproteção *POTT* e *DTT* e a TD21 em operação *stand alone*.

Número do caso	Subestação VIL (ms)			Subestação JAU (ms)		
	TD21 & OC21	DTT	POTT	TD21 & OC21	DTT	POTT
R1	5,5	5,5	9,5	6,5	6,5	5,6
R2	9,8	9,8	5,9	9,8	9,8	5,4
R3	1,9	1,9	6,4	o	5,9	4,9
R4	1,2	1,2	5,4	o	5,2	4,7
R5	0,6	0,6	5,1	2,2	2,2	5,0
R6	1,2	1,2	5,4	o	5,2	4,7
R7	4,7	4,7	6,8	o	8,7	4,9
R8	o	o	o	o	o	o

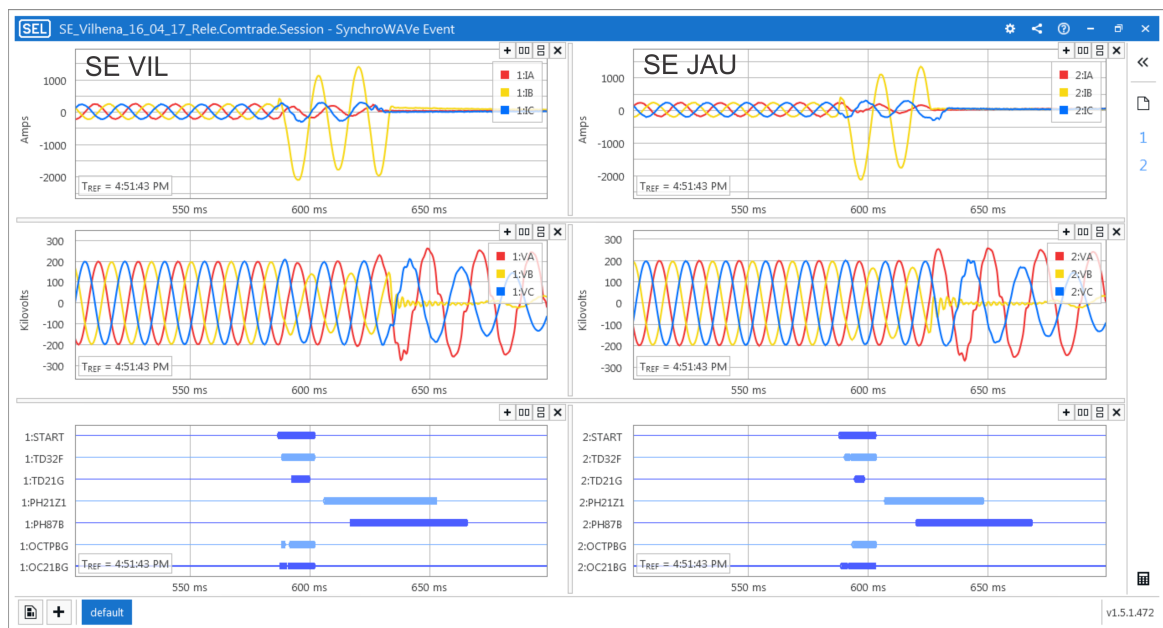
o = Não operou.

**Fonte:** Autoria própria.

o desempenho do T400L. Em sequência, os resultados obtidos são sintetizados e discutidos visando trazer uma ideia geral das melhorias promovidas pela aplicação do relé de proteção avaliado no sistema de transmissão real associado. Para tanto, o desempenho das funções de proteção tradicionais é obtido a partir da indicação associada às *word-bits* PH21Z1 e PH87, as quais representam a atuação em primeira zona da função de distância e a atuação da função diferencial de linha, respectivamente.

#### 6.1.1.1 Análise Pontual de Desempenho — Caso R1

Ilustram-se na Figura 6.1 as tensões e correntes para cada uma das fases bem como as *word-bits* de atuação das funções aplicadas no domínio do tempo e no domínio fasorial para o caso real de falta R1. Trata-se de uma falta aplicada aproximadamente no meio do circuito de transmissão C3 do sistema SR1 com ângulo de incidência ( $\theta$ ) de falta próximo ao cruzamento da tensão pelo zero. Percebe-se, a partir da componente de frequência subsíncrona presente na corrente da fase sob falta (fase B) referente ao terminal VIL, que o compensador estático e/ou o banco de capacitor associado aos circuitos C1 e C2 encontravam-se em operação no instante de ocorrência do defeito na linha. Ainda que diante dessa situação, a qual se caracteriza como

**Figura 6.1:** Tensões, correntes e *word-bits* de atuação do T400L para o caso real R1.

Fonte: Autoria própria.

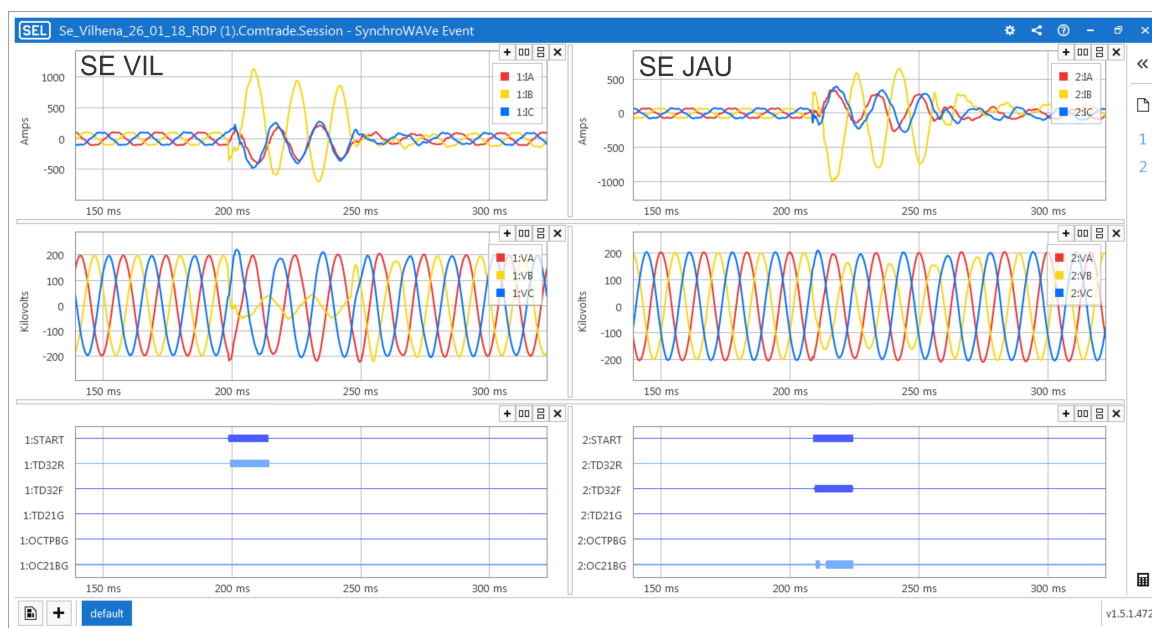
de alta complexidade para os equipamentos de proteção de linhas, o relé T400L atuou de forma segura e confiável. Além disso, comparando-se o tempo das respostas das funções aplicadas no domínio do tempo com aquelas aplicadas no domínio fasorial, constata-se que reduções da ordem de um ciclo fundamental são observadas, possibilitando um aumento nas margens de estabilidade do sistema de transmissão associado.

### 6.1.1.2 Análise Pontual de Desempenho — Caso R8

Apresentam-se na Figura 6.2 os sinais de corrente e tensão bem como as *word-bits* de atuação referentes às funções aplicadas no domínio do tempo para o caso real de falta R8. Dos resultados, a partir da habilitação da variável  $TD32R$ , a qual indica distúrbios reversos ao terminal de referência, constata-se que a falta é reversa ao terminal de Vilhena, incidindo, provavelmente, em uma das LTs que interligam as subestações Vilhena e Pimenta Bueno (ver Figura 5.1). Como consequência, garante-se a restrição de atuação do *POTT* bem como da *TD21* no terminal VIL, visto que a *TD32* supervisiona o elemento de distância.

Por outro lado, com referência ao terminal JAU, constata-se que as indicações da função direcional encontram-se corretas, uma vez que a falta incidente está a frente do mesmo. Adici-



**Figura 6.2:** Tensões, correntes e *word-bits* de atuação do T400L para o caso real R8.

Fonte: Autoria própria.

onalmente, conforme apresentado no capítulo de fundamentação da TD21, para faltas externas à zona de proteção da função, a tensão de operação se torna menor que a tensão de restrição, impedindo a atuação do elemento, conforme apresentado no terminal JAU. Por fim, ressalta-se a importância dos elementos de sobrecorrente direcionais, os quais constituem um reforço à restrição da atuação do dispositivo para cenários de faltas externas. Do exposto, nota-se que o T400L foi capaz de restringir corretamente sua atuação, demonstrando-se seguro para as situações nas quais perturbações intensas iniciadas em sistemas adjacentes geram incrementos de corrente e tensão significativos no terminal imediatamente a frente do defeito.

### 6.1.1.3 Síntese dos Resultados

Exposto o desempenho do relé SEL T400L para dois casos pontuais de falta, sintetizam-se os demais visando apresentar uma ideia geral da atuação do dispositivo. Dos resultados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, nota-se que os ganhos no tempo de atuação promovidos pela aplicação do T400L na proteção da linha são significativos, com valor médio de redução da ordem de 17 ms quando comparado ao desempenho do equipamento de proteção encarregado atualmente de proteger a linha, o qual é baseado em funções fasoriais. Desse modo, pode-se afirmar que o equipamento de proteção desenvolvido pela SEL é responsável por acelerar

significativamente a atuação da proteção na linha quando não há dúvidas sobre a severidade da falta incidente.

Quanto à resposta dos elementos de sobrecorrente, observa-se que não comprometem a atuação do T400L, embora possuam influência sobre o tempo de atuação final do dispositivo. Todavia, para tais cenários, espera-se que a resposta do relé seja acelerada pelas funções baseadas em ondas viajantes, as quais, devido ao seu princípio de operação, são intrinsecamente mais rápidas. Por fim, percebe-se que a função de distância restringiu corretamente para todas as situações de faltas externas à sua zona de proteção, não observando nenhum caso de sobrealcance dessa.

Por outro lado, para o caso R5, constatou-se subalcance da TD21, sendo esse menor do que 10% do comprimento da LT, o que se encontra em conformidade com o subalcance médio esperado para esse elemento de distância (Schweitzer *et al.*, 2016). De fato, a depender das condições de falta bem como dos transitórios eletromagnéticos induzidos pelos TPCs, as funções de proteção de distância podem subalcançar, conforme apresentado por Schweitzer *et al.* (2016). Além das condições supracitadas, a TD21 tende a subalcançar também quando as tensões de operação e restrição se aproximam, tal como para os cenários de falta incidentes próximos à zona de proteção dessa função, visto que a diferença de tensão integrada é insuficiente para superar a margem mínima associada à sua operação.

### 6.1.2 Casos simulados de falta

Como segunda etapa de avaliação do desempenho do T400L, apresentam-se cenários de faltas simulados em ATP, os quais foram obtidos a partir da modelagem do sistema SR1 nessa plataforma de simulação de transitórios. Para tanto, empregou-se uma taxa de amostragem de 1 MHz, permitindo que todas as funções de proteção embarcadas no relé T400L fossem analisadas concomitantemente.

Apresentam-se na Tabela 6.3 os resultados obtidos para um total de sete casos, nos quais a localização e o tipo da falta foram variados. De forma análoga aos resultados apresentados anteriormente neste capítulo, as indicações das funções TD21, TD32, TW32 e TW87 estão associadas à habilitação das *word-bits* TD21G ou TD21P, TD32F, TW32F e TW87PKP,

**Tabela 6.3:** Tempo de Operação das funções TD21, TD32, TW32 e TW87 considerando casos simulados de falta.

Número do caso	Tipo de Falta Loc. a partir de VIL (pu)	SE	Tempo de Operação (ms)	
			(TD21/OC21) (TD32/TW32/OCTP) (TW87/OC87)	
S1	Int. AB / 0,5	VIL	(●8,9 / ●1,6) (●1,8 / ●0,6 / ●2,9) (●1,8 / ●2,9)	
		JAU	(●8,0 / ●1,5) (●1,7 / ●0,6 / ●2,2) (●1,8 / ●2,2)	
S2	Int. AT / 0,05	VIL	(●1,6 / ●0,8) (●1,1 / ●0,1 / ●1,0) (●2,3 / ●1,0)	
		JAU	(○ / ●2,3) (●2,4 / ●1,1 / ●2,8) (●2,3 / ●2,8)	
S3	Int. AT / 0,30	VIL	(●2,5 / ●1,2) (●1,5 / ●0,4 / ●1,7) (●2,1 / ●1,7)	
		JAU	(○ / ●1,8) (●2,0 / ●0,8 / ●2,3) (●2,1 / ●2,3)	
S4	Int. AT / 0,70	VIL	(○ / ●1,8) (●2,0 / ●0,8 / ●2,5) (●2,0 / ●2,5)	
		JAU	(●2,1 / ●1,1) (●1,4 / ●0,3 / ●1,6) (●2,0 / ●1,6)	
S5	Ext. AT / 0,50 (em C2)	VIL	(○ / ○) (○ / ○ / ○) (○ / ○)	
		JAU	(○ / ○) (○ / ○ / ○) (○ / ○)	
S6	Ext. AT / 1,0 (em JAU)	VIL	(○ / ●2,8) (●2,6 / ●1,2 / ○) (○ / ○)	
		JAU	(○ / ○) (○ / ○ / ○) (○ / ●2,4)	
S7	Ext. AT / 0,0 (em VIL)	VIL	(○ / ○) (○ / ○ / ○) (○ / ●4,2)	
		JAU	(○ / ●2,4) (●2,4 / ●1,2 / ●2,9) (○ / ●2,9)	

● = Operou / ○ = Não operou / Loc. = Localização / Int. = Interna / Ext. = Externa.

**Fonte:** Autoria própria.

respectivamente. Mais uma vez, dissocia-se o desempenho das funções de proteção do desempenho dos elementos de sobrecorrente. Assim, pretende-se esclarecer como essas funções se inter-relacionam contribuindo para o tempo final de atuação do T400L.

Por fim, visto que uma bancada de testes laboratorial foi utilizada para execução dos casos de falta e a fibra ótica disposta entre os equipamentos de proteção possui comprimento desprezível, a latência do canal de comunicação é ínfima. Além disso, apenas faltas iniciadas no pico da tensão foram contabilizadas, as quais caracterizam os cenários de curto-circuito mais adversos para a manutenção da estabilidade da rede elétrica e para os quais se espera a atuação das funções de proteção baseadas em OV's (Schweitzer *et al.*, 2015). Ressalta-se que, para os cenários de faltas simuladas, é conhecido o instante de aplicação do defeito na linha, uma vez que esse é obtido a partir do fechamento de uma chave controlada em ATP, a qual efetua a interligação para a terra ou entre fases, aplicando a falta na linha. Neste contexto, cria-se uma variável digital denominada FALTA, a qual contém o estado da chave supracitada. Consequentemente, para os casos simulados, o tempo de operação das funções de proteção avaliadas é tomado a

partir do instante real de aplicação do defeito, o qual está contabilizado nessa variável binária.

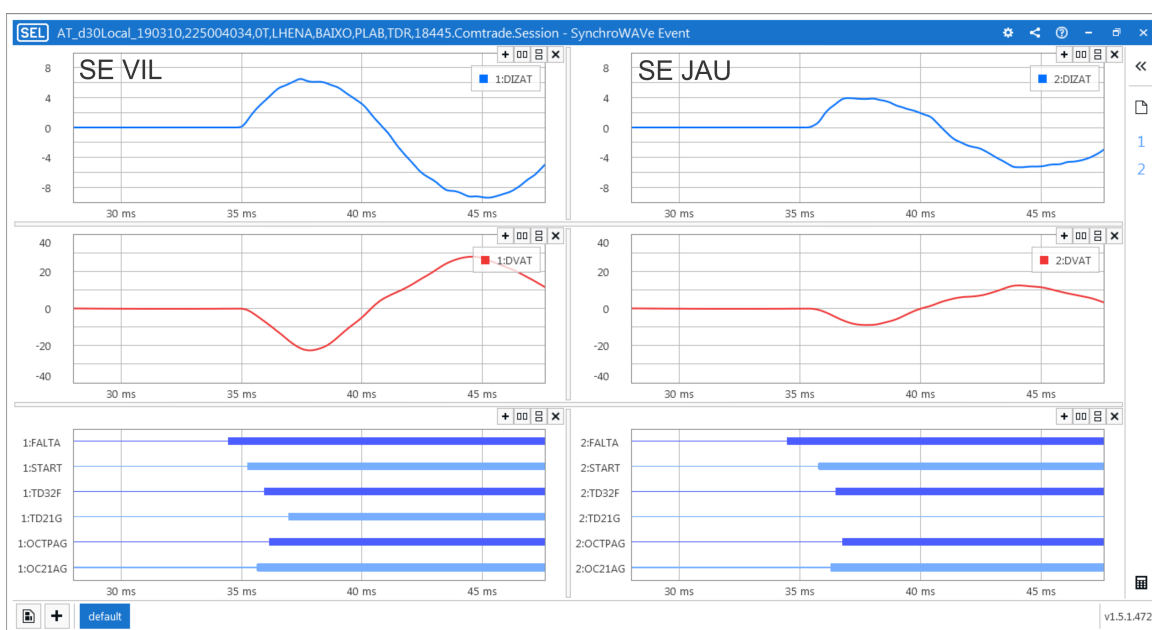
De forma similar à análise adotada para os casos reais de falta, para os cenários simulados também será apresentado inicialmente o desempenho das funções de proteção avaliadas a partir de dois casos pontuais de falta (S3 e S5). Em seguida, os resultados obtidos são sintetizados e discutidos visando trazer uma ideia geral a respeito do desempenho do equipamento, descartando-se as melhorias e peculiaridades associadas à sua aplicação.

### 6.1.2.1 Análise Pontual de Desempenho — Caso S3

A partir desse momento, na análise dos casos pontuais, os resultados apresentados serão separados por funções baseadas no mesmo princípio de operação. Assim, apresentam-se, na Figura 6.3, as grandezas incrementais de corrente (DIZAT) e tensão (DVAT) associadas ao loop sob falta (AT) bem como as *word-bits* de atuação das funções TD para o caso simulado de falta S3.

Dos resultados, percebe-se que as grandezas incrementais de tensão e corrente possuem polaridades contrárias para casos de faltas diretas ao terminal da linha monitorado, o que é

**Figura 6.3:** Grandezas incrementais de corrente e tensão e as *word-bits* de atuação referentes às funções TD embarcadas no T400L para o caso simulado S3.



Fonte: Autoria própria.

confirmado pelas medições obtidas em ambos os terminais da LT. Em decorrência disso, a TD32 sinaliza rapidamente, em ambos os terminais da linha, a presença de distúrbio direto. O relé mais próximo ao local do defeito efetua o envio do sinal de permissivo e, identificando-se no terminal oposto a presença de defeito a frente bem como níveis de corrente característicos aos curtos-circuitos, garante-se a atuação do esquema de teleproteção *POTT*.

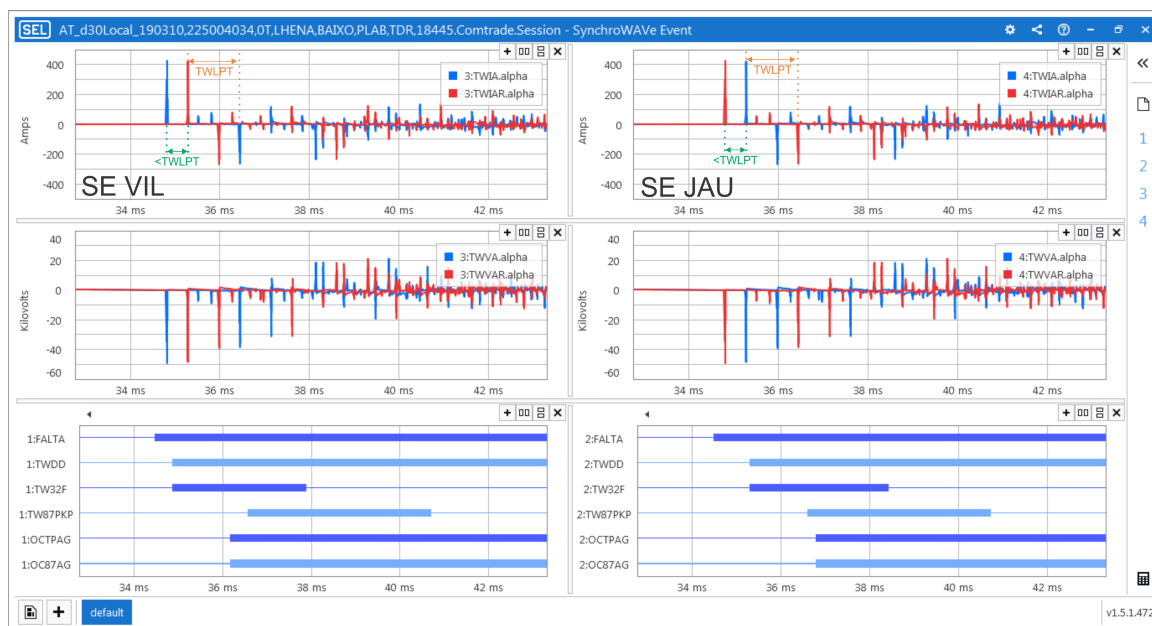
Por outro lado, nota-se que a magnitude de DIZAT e DVAT é maior no terminal mais próximo à falta. Desse modo, para o referido terminal da linha, a TD21 rapidamente detecta a presença de falta interna à zona de proteção, visto que a tensão de operação excede a de restrição rápido e significativamente. Todavia, para o terminal oposto, uma vez que a falta incide exatamente no alcance da proteção de distância, as tensões de operação e restrição tendem a se igualar. Como consequência, a atuação da TD21 é restringida, caracterizando-se um cenário típico de subalcançe.

Ilustram-se na Figura 6.4 as ondas viajantes de tensão e corrente para o loop de falta sensibilizado (AT) bem como as *word-bits* de atuação das funções TW para o caso simulado S3. Antes de apresentar a discussão a respeito dos resultados obtidos, esclarece-se o significado das nomenclaturas utilizadas para as OV's de corrente e tensão: TWIA.alpha e TWIAR.alpha referem-se às OV's de corrente de modo alfa referidas à fase A para o terminal de referência e para o terminal oposto, respectivamente. De forma análoga é a nomenclatura para as OV's de tensão TWVA.alpha e TWVAR.alpha.

Dos resultados apresentados, identifica-se que as primeiras ondas viajantes de corrente e tensão incidentes em ambos os terminais da linha possuem polaridades contrárias, caracterizando-se, portanto, falta direta a ambos os terminais dessa. Como resultado, rapidamente após a incidência das OV's, a TW32 sinaliza a presença de defeito direto por meio da *word-bit* TW32F.

Por outro lado, as primeiras OV's de corrente incidentes em ambos os terminais da linha protegida distam no tempo por um período menor que o tempo de trânsito da linha e possuem igual polaridade, características típicas às faltas internas. Assim, tão logo as primeiras OV's de corrente alcançam um dos terminais da linha, estabelece-se, no terminal oposto, uma janela de busca centrada em *TWLPT* segundos após a primeira onda incidente no terminal de referência com o objetivo de identificar se a OV que entrou em um terminal da LT saiu no outro, situação característica às faltas externas. Conforme demonstrado na Figura 6.4, detecta-se, nessa janela

**Figura 6.4:** Ondas viajantes de tensão e corrente e as *word-bits* de atuação referentes às funções TW embarcadas no T400L para o caso simulado S3.



Fonte: Autoria própria.

de busca, conteúdo expressivo associado à TWIA.alpha. De fato, essa situação era esperada, pois parte das OV's incidentes nas terminações da linha refratam em direção aos sistemas e linhas adjacentes. Como as linhas paralelas possuem o mesmo comprimento da linha protegida, exatamente após o tempo de trânsito dessa, as OV's refratadas que transitavam pelos circuitos paralelos alcançam novamente o outro terminal da linha monitorada (C3).

Mesmo perante a situação supracitada, a TW87 é capaz de operar corretamente, uma vez que devido à atenuação sofrida no percurso percorrido, as OV's identificadas na janela de busca apresentam magnitude expressivamente menor do que as primeiras ondas incidentes. Como resultado, a grandeza de operação do elemento diferencial excede a característica de restrição, garantido que a TW87 seja sensibilizada, conforme indica a habilitação da *word-bit* TW87PKP.

Por fim, quanto à resposta dos elementos de sobrecorrente, percebe-se que rapidamente indicam que o evento incidente pode ser classificado como um curto-circuito. Assim sendo, afirma-se que esses elementos garantem a segurança das indicações das funções de proteção aplicadas no domínio do tempo bem como não comprometem a velocidade de suas atuações.

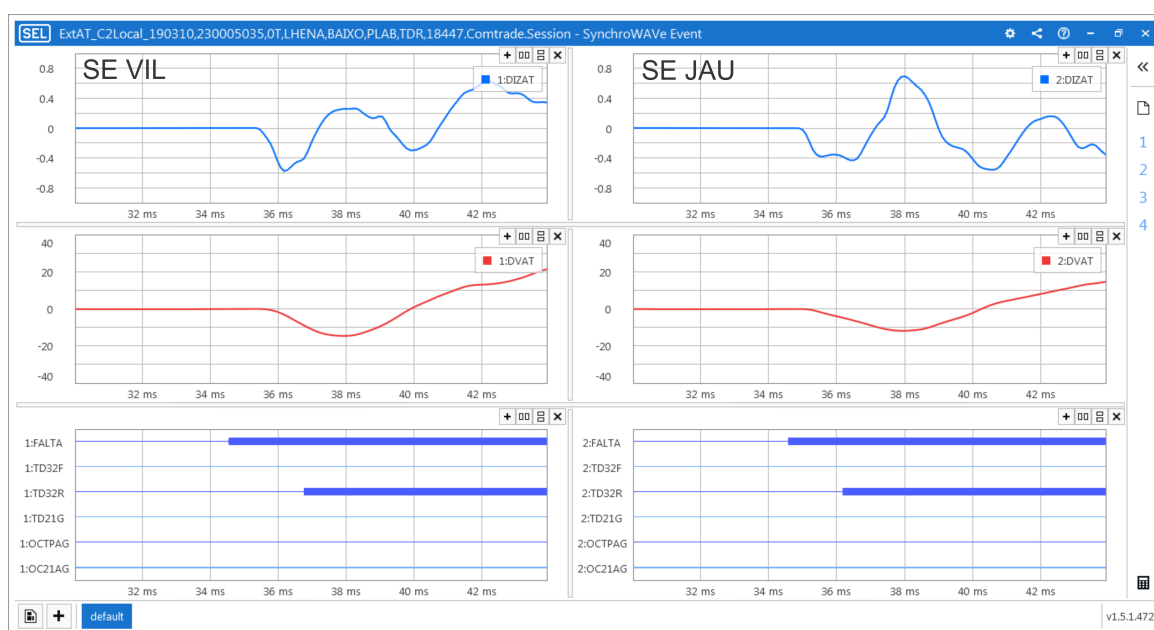
### 6.1.2.2 Análise Pontual de Desempenho — Caso S5

O caso simulado S5 visa apresentar o desempenho do relé T400L para um dos cenários de faltas mais adversos quando se tratando de sistemas com linhas paralelas, nos quais o acoplamento magnético de sequência zero observado entre os circuitos de transmissão impõem desafios à operação dos relés de proteção.

Apresentam-se, na Figura 6.5, as grandezas incrementais de corrente e tensão para o loop de falta sensibilizado (AT) quando da ocorrência de uma falta externa ao circuito C3, porém interna ao C2, o qual percorre em paralelo ao primeiro. Dos resultados obtidos, constata-se que, em ambos os terminais da linha protegida, para os primeiros instantes de falta, DIZAT e DVAT possuem a mesma polaridade, característica comum aos cenários de faltas reversas ao terminal de referência. Dessa forma, rapidamente, a função direcional habilita a *word-bit* que garante a restrição da atuação do esquema de teleproteção *POTT* — TD32R.

Ainda que, após os primeiros instantes do distúrbio, as tensões e correntes incrementais de loop possam apresentar polaridades contrárias, o que caracterizaria uma falta direta ao terminal, a indicação inicial da TD32 é assim mantida por alguns milissegundos graças ao uso de torques integrados, os quais permitem a estabilização das indicações da função direcional.

**Figura 6.5:** Grandezas incrementais de corrente e tensão e as *word-bits* de atuação referentes às funções TD embarcadas no T400L para o caso simulado S5.



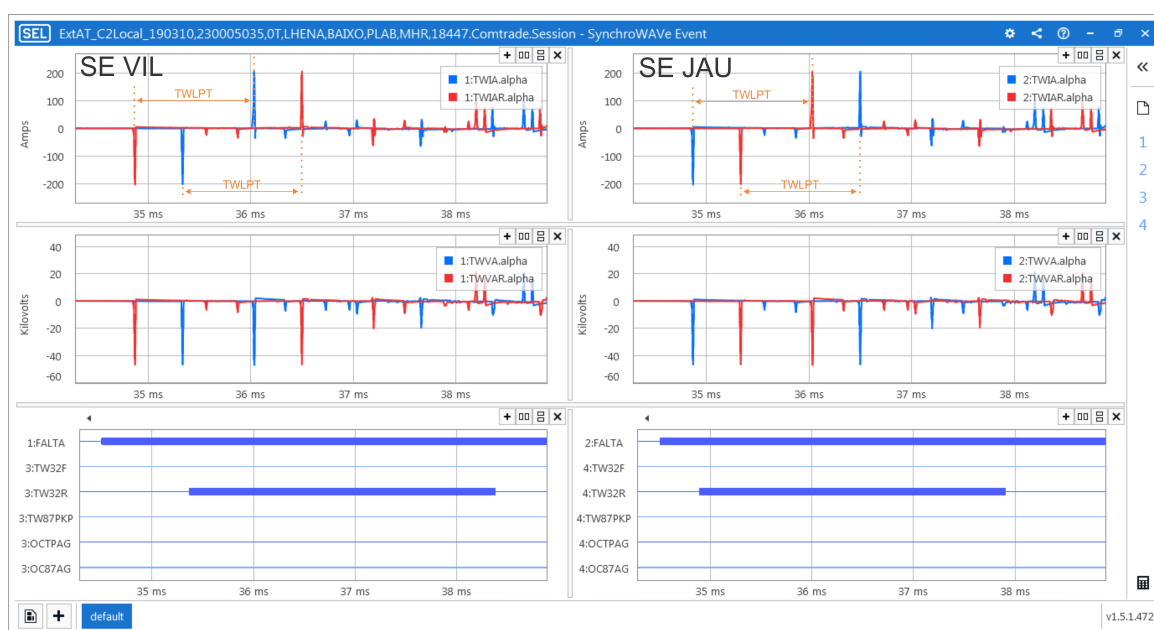
Fonte: Autoria própria.

Como consequência, impede-se o envio do sinal permissivo de *trip* que inicia o processo de atuação do *POTT*. É importante ressaltar que as distorções observadas na forma de onda da corrente réplica incremental para o loop de falta AT, decorrentes do acoplamento magnético de sequência zero presente inter-circuitos, desafiam significativamente a operação da TD32. Ainda assim, essa é capaz de restringir corretamente a sua atuação, mantendo, portanto, a segurança do T400L.

Quanto à TD21, essa restringe corretamente a sua operação, visto que a intensidade das variações observadas nas grandezas incrementais de tensão e corrente é reduzida. Desse modo, a grandeza de operação gerada não é suficiente para exceder a tensão de restrição associada.

Apresentam-se, na Figura 6.6, as OV's de tensão e corrente associadas ao loop sob falta bem como as *word-bits* de atuação referentes às funções TW. Dos resultados, constata-se que as primeiras OV's de tensão e corrente incidentes em ambos os terminais da linha protegida apresentam a mesma polaridade, o que caracteriza falta reversa ao terminal tomado como referência. Conseqüentemente, a TW32 rapidamente restringe o envio de permissivo para o terminal oposto da linha, conforme demonstrado na habilitação da *word-bit* TW32R. Ademais, para os cenários de faltas externas incidentes em circuitos paralelos de transmissão, é esperado

**Figura 6.6:** Ondas viajantes de tensão e corrente e as *word-bits* de atuação referentes às funções TW embarcadas no T400L para o caso simulado S5.



Fonte: Autoria própria.



que as primeiras OV's de correntes observadas em ambos os terminais da linha possuam a mesma polaridade, visto que as OV's lançadas no ponto de falta se propagam em direção à polaridade dos TCs empregados na linha. De fato, para o caso de falta analisado, percebe-se que as primeiras TWIA.alpha e TWIAR.alpha possuem igual polaridade.

Na TW87, tão logo detectadas as OV's incidentes no terminal de referência, cria-se, no terminal oposto da linha, uma janela de busca centrada no tempo de trânsito dessa cujo o objetivo é constatar se a OV que entrou em um terminal, saiu pelo outro com polaridade contrária à primeira, cenário típico às faltas externas. Perante o resultado ilustrado, afere-se que, realmente, a OV de corrente entra por um terminal da linha e, transcorridos  $TWLPT$  segundos, sai pelo terminal oposto com polaridade contrária. Para tais situações de falta, a grandeza de restrição torna-se maior que a de operação, impossibilitando a atuação da proteção diferencial, conforme evidenciado no estado da variável TW87PKP.

### 6.1.2.3 Síntese dos Resultados

Apresentado o desempenho do T400L para dois casos simulados de falta, sintetizam-se os demais resultados visando trazer uma ideia geral da atuação do equipamento. Dos resultados apresentados na Tabela 6.3, percebe-se que as funções de proteção aplicadas no domínio do tempo continuam sendo capazes de acelerar o disparo de *trip* na linha protegida, quando comparado às atuações das funções de proteção tracionais atualmente empregadas nessa.

Confirma-se que a TW32 é capaz de acelerar o esquema de teleproteção *POTT*, visto que, devido ao seu princípio de operação, opera dentro de algumas centenas de microssegundos após a incidência do distúrbio. Além disso, para alguns casos de falta, observa-se que a TD21 tende a subalcançar a depender dos transitórios eletromagnéticos observados no sistema após o início da falta (Schweitzer *et al.*, 2016). Como consequência, a função de distância tem a sua operação restringida no terminal associado. Todavia, para os resultados apresentados, a partir da utilização do esquema de teleproteção *DTT*, a restrição mencionada pode ser superada, garantindo uma atuação rápida e confiável da proteção de distância na linha monitorada.

A TD32, mesmo perante situações de elevada influência do acoplamento magnético de sequência zero, foi capaz de manter decisões seguras, seja para atuação ou restrição de sua

operação. Quanto à TW87, nota-se que foi capaz de distinguir corretamente faltas internas das externas para todos os casos de falta analisados. De fato, assumindo que as OV's de corrente incidentes sejam capazes de satisfazer todas as camadas de segurança associadas à função diferencial, pode-se concluir que o tempo de operação da TW87 depende principalmente da latência do canal de comunicação bem como do comprimento da linha (em decorrência do tempo de trânsito da mesma). Ainda assim, considerando que o atraso de comunicação típico para o SR1 é de 4 ms, tempos de operação máximos da ordem de pouco mais de 6 ms seriam observados para a TW87. Fica evidenciado os ganhos que essa é capaz de promover frente a proteção diferencial tradicional atualmente encarregada de garantir a integridade do C3.

Do exposto, enfatiza-se que, para todos os casos de faltas simulados, tanto a operação quanto a restrição da atuação do T400L ocorreram conforme esperado. Ainda que para os casos desafiadores de falta incidentes em circuitos de transmissão que percorrem em paralelo ao da linha monitorada, a ocorrência de um falso *trip* não foi observada. Para os casos mais adversos de falta, reduções da ordem de um ciclo fundamental são observadas na atuação quando comparadas às respostas dos relés de proteção tradicionais. Adicionalmente, constata-se que as funções TW possibilitam que atuações ainda mais rápidas sejam obtidas quando os distúrbios incidentes não deixam dúvidas a respeito da severidade do defeito. Ademais, ressalta-se que, embora os elementos de sobrecorrente possuam influência sobre o tempo de atuação final do dispositivo, os ganhos ou perdas resultantes no tempo de operação são irrelevantes para que alterações nas margens de estabilidade da rede elétrica associada ocorram.

## 6.2 RESULTADOS PARA O SR2

Nesta seção, será apresentado o desempenho do T400L quando empregado na proteção do circuito de transmissão C2 disposto entre as subestações Colinas (COL) e Imperatriz (IPZ), circuito esse que constitui importante malha de interligação entre os subsistemas norte e sul do SIN, conforme apresentado na Seção 5.1.2. Apresentar-se-á o desempenho apenas para dois casos pontuais que visam representar configurações da rede elétrica até então não avaliadas. Portanto, tratam-se de situações de energização de circuitos de transmissão adjacentes ao monitorado bem como faltas internas à linha protegida com os bancos de capacitores referentes à compensação série estando em serviço.

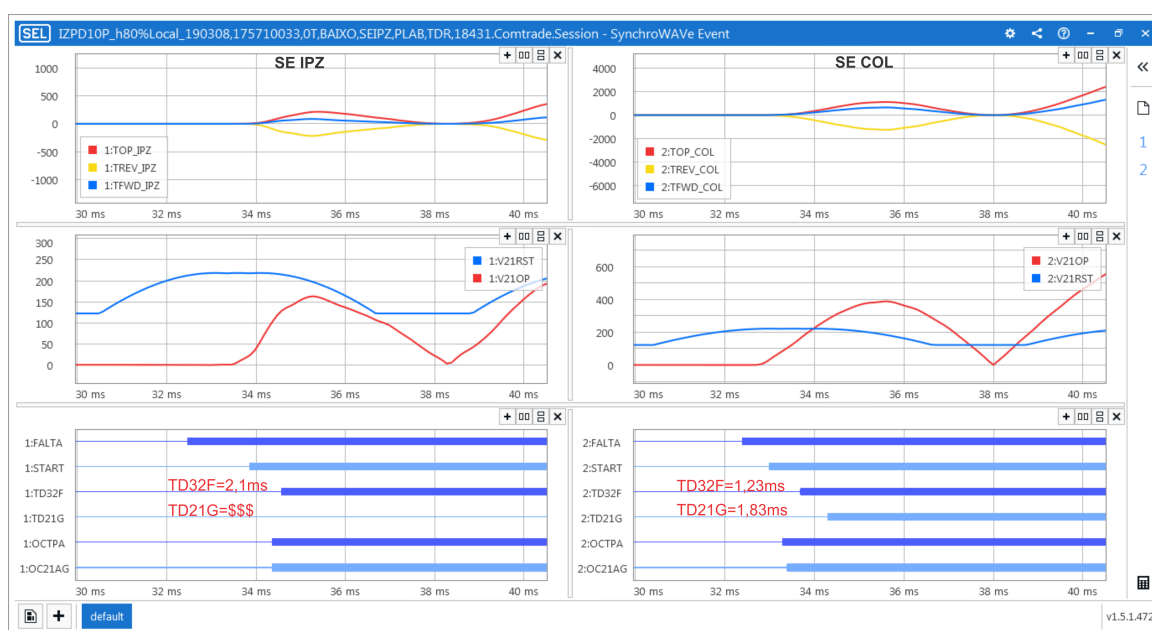
### 6.2.1 Análise Pontual de Desempenho — Falta Interna

Apresentam-se, na Figura 6.7, os torques e tensões de operação e restrição relacionados às funções TD ( $T_{OP}$ ,  $T_{FWD}$ ,  $T_{REV}$ ,  $V_{21OP}$  e  $V_{21RST}$ ) para uma falta interna do tipo AT franca aplicada em 20% do comprimento da linha tomando como referência a SE COL e incidente no pico da tensão, ou seja,  $\theta = 90^\circ$ . Conforme mencionado ao longo do presente trabalho, as funções de proteção baseadas em grandezas incrementais têm a operação embasada em loops de falta. Assim sendo, as curvas apresentadas referem-se ao loop sob falta (AT).

Enfatiza-se que as grandezas de restrição e operação apresentadas, principalmente para a TD21, visam a trazer um caráter apenas qualitativo, visto que algumas características essenciais a uma análise minuciosa dessas curvas são mantidas em sigilo, tal como a implementação dos integradores associados e o reforço na característica de restrição da TD21 ilustrada em Metzger *et al.* (2018). Ainda que perante as limitações mencionadas, importantes conclusões a respeito do desempenho das funções TD podem ser obtidas.

Dos resultados apresentados, percebe-se que, em ambos os terminais da linha protegida, logo após os primeiros instantes de incidência do distúrbio (contabilizado pela habilitação da

**Figura 6.7:** Torques e tensões de operação e de restrição relacionados às funções TD para uma falta interna aplicada a 20% da SE COL.



Fonte: Autoria própria.

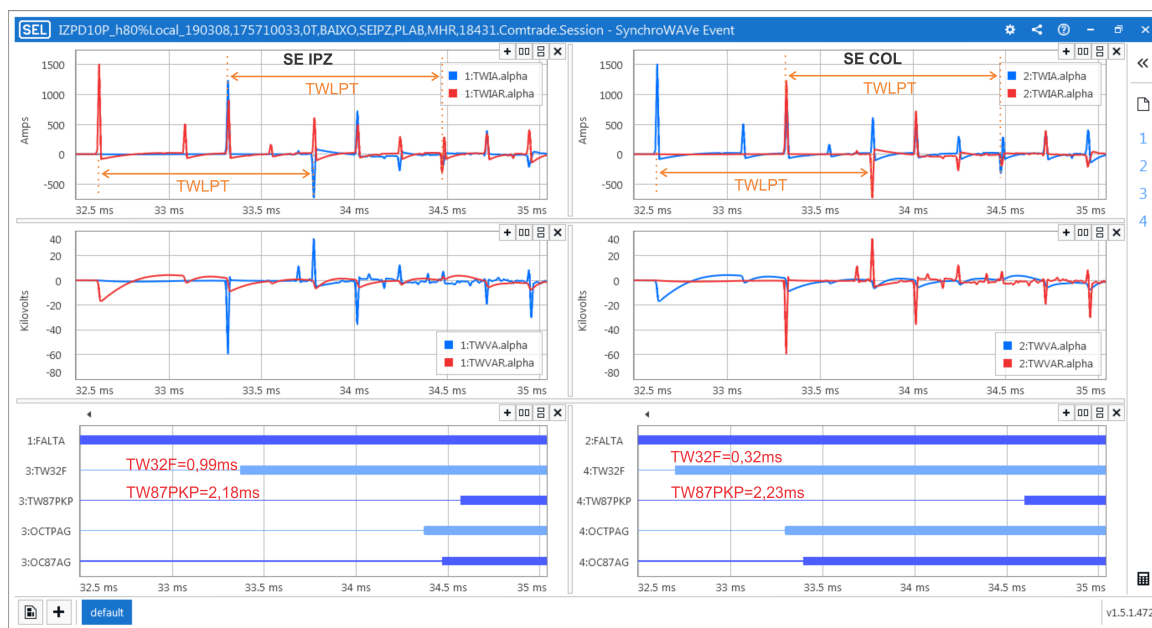
*word-bit* START), o torque de operação ( $T_{OP}$ ) excede o limiar de restrição para distúrbios a frente ( $T_{FWD}$ ). Integrando essas grandezas e comparando-as, tão logo a de operação exceder a de restrição associada a um distúrbio a frente, a TD32 envia o sinal permissivo de atuação, a partir da habilitação da *word-bit* TD32F, para o terminal oposto ao tomado como referência para a análise. Identificado defeito direto e satisfeita a lógica de supervisão por sobrecorrente no terminal que recebe o permissivo, a atuação do esquema de teleproteção *POTT* é obtida. Além disso, constata-se que o torque de restrição associado a distúrbios reversos ( $T_{REV}$ ) se distancia do torque de operação, garantindo ao elemento direcional indicações seguras e confiáveis.

Quanto à TD21, observa-se claramente que a tensão de operação não excede a de restrição no terminal referente à SE IPZ. De fato, para faltas externas à zona de proteção dessa função,  $V_{21OP}$  tende a se distanciar de  $V_{21RST}$ , restringindo corretamente a atuação da função de distância. Por outro lado, quando da incidência de distúrbios internos ao alcance dessa, rapidamente a tensão de operação excede a de restrição, conforme observado no terminal da linha associado à SE COL. Assim, a atuação da TD21 é garantida tão logo a diferença integrada entre as grandezas de operação e restrição exceda o limiar de atuação, a TD32 identifique distúrbio a frente do terminal e a lógica de supervisão por sobrecorrente seja satisfeita, tal como o ilustrado na Figura 6.7.

Ilustram-se na Figura 6.8 as OV's de corrente e tensão bem como as *word-bits* de atuação associadas às funções TW para a mesma falta interna do tipo AT franca aplicada em 20% do comprimento da linha tomando como referência a SE COL e incidente no pico da tensão.

Do exposto, constata-se que, em ambos os terminais da linha, as primeiras OV's de tensão e corrente incidentes possuem polaridades contrárias, indicando a ocorrência de distúrbios a frente do terminal tomado como referência. Neste contexto, rapidamente a TW32 envia o sinal permissivo de atuação para o terminal oposto ao de análise a partir da habilitação da variável digital TW32F. Por outro lado, na TW87, percebe-se que, mesmo se tratando de uma falta interna à LT protegida, devido às reflexões oriundas dos sistemas adjacentes, encontra-se na janela de busca associada à função conteúdo expressivo referente à TWIA.alpha. Ainda que perante tal situação, devido à atenuação sofrida pelas OV's durante a propagação pelos sistemas adjacentes, a magnitude das ondas encontradas na janela de busca é bastante reduzida quando comparadas às primeiras incidentes. Como consequência, satisfaz-se a lógica de *pickup* da

**Figura 6.8:** Ondas viajantes de corrente e tensão relacionadas às funções TW para uma falta interna aplicada a 20% da SE COL.



Fonte: Autoria própria.

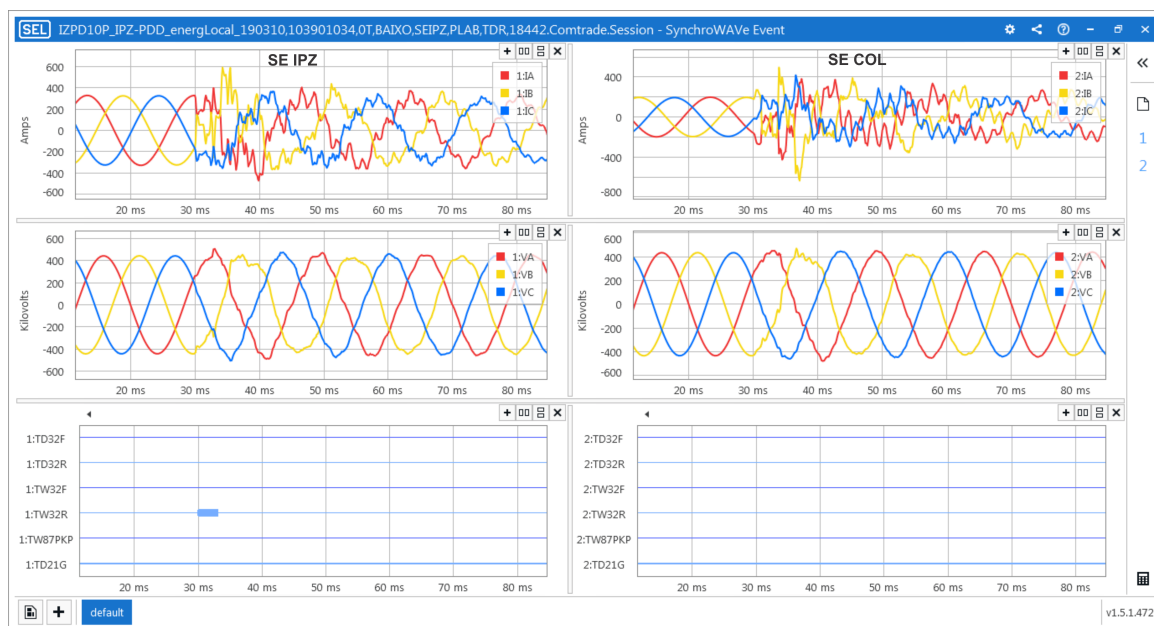
TW87, ou seja, a grandeza de operação excede o produto entre *slope* e variável de restrição, garantindo assim a correta atuação do elemento diferencial.

Para sistemas com compensação série, a TD32 supervisiona a TW87. Assim, atuações rápidas do esquema diferencial dependem das sinalizações da função direcional. Dos resultados, nota-se que a indicação da TD32 não compromete a velocidade da TW87. Adicionalmente, evidencia-se que a TW32 é capaz de identificar o distúrbio já nos primeiros instantes de falta, acelerando o envio do sinal permissivo de atuação, e, conseqüentemente, a operação do T400L.

### 6.2.2 Análise Pontual de Desempenho — Energização de Linha Adjacente

Apresentam-se, na Figura 6.9, as tensões, correntes e *word-bits* de atuação referentes ao T400L para a energização das linhas que interligam as subestações IPZ e PD (Presidente Dutra). Dos resultados, percebe-se que apenas a TW32 fora sensibilizada. De fato, durante a energização de linhas de transmissão, transitórios eletromagnéticos de alta frequência são lançados, propagando-se em direção a ambos os terminais da linha. Portanto, no terminal do circuito C2 associado à SE IPZ, constata-se a presença de um distúrbio reverso, visto que as OV's de tensão e corrente possuem polaridades contrárias.

**Figura 6.9:** Tensões, correntes e *word-bits* de atuação referentes ao T400L para energização das linhas que interligam as SE IPZ e SE PD.



Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, as OV's de corrente que entram em um terminal da linha, saem pelo outro com polaridade contrária devido à disposição dos TCs na linha. Neste contexto, a grandeza de restrição do elemento diferencial torna-se maior que a de operação, restringindo corretamente a atuação do mesmo. Por fim, observa-se que o incremento de tensão decorrente do distúrbio incidente é mínimo, contribuindo para que as funções TD não fossem sensibilizadas em ambos os terminais da linha. Como consequência, assume-se que o sistema monitorado encontra-se em regime normal de operação.

Ainda que a entrada em serviço de novos sistemas de transmissão imponha modificações ao regime de operação até então vigente, trata-se de um cenário característico às redes elétricas reais. Conseqüentemente, como tais mudanças não impõem riscos à integridade física da linha protegida, devem ser tratadas como normais pelos dispositivos de proteção. Do exposto, percebe-se que o T400L é, mais uma vez, seguro e confiável em suas indicações, sendo ainda capaz de processar uma faixa espectral até então desconhecida por grande parte dos relés de proteção reais.

### 6.3 RESULTADOS PARA O SS1

Nesta seção, apresentam-se análises complementares do desempenho do T400L para o sistema simulado 1 (SS1), a partir do qual importantes parâmetros de operação e curto-circuito da rede elétrica são variados. Em decorrência, possibilita-se trazer uma concepção geral a respeito da complementariedade entre as funções embarcadas no dispositivo de proteção bem como ilustrar as principais vantagens e limitações no emprego do T400L na proteção de linhas de transmissão. Para tanto, pontualmente, destaca-se a influência que o ângulo de incidência, resistência de falta e transformadores para instrumentos possuem sobre o desempenho do equipamento. Em seguida, demonstra-se a necessidade do emprego do relé companheiro para a proteção unitária da linha protegida. Por fim, a partir das simulações em massa realizadas, apresenta-se o desempenho geral do relé SEL-T400L.

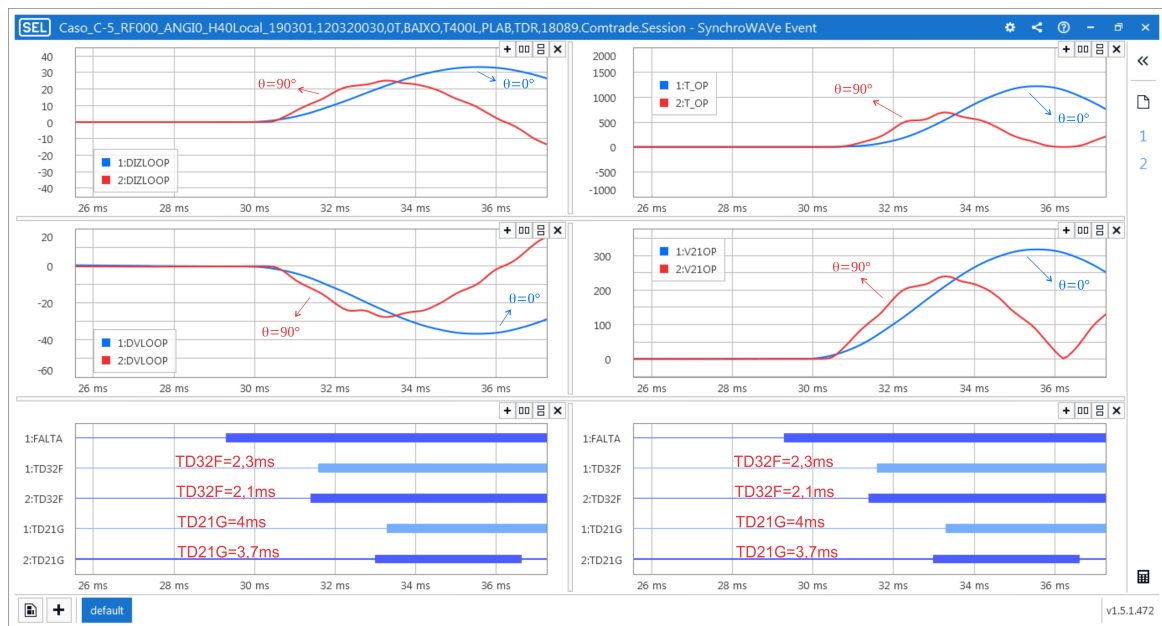
#### 6.3.1 A Influência do Ângulo de Incidência de Falta

O ângulo de incidência de falta ( $\theta$ ) influencia diretamente a magnitude das grandezas incrementais e OV's resultantes. Como consequência, espera-se que o desempenho do T400L seja afetado por essa característica de falta. Neste contexto, visando esclarecer o desempenho do equipamento de proteção avaliado perante tais situações, aplica-se uma falta AT franca em 40% da LT protegida, tomando como referência o terminal local, considerando dois cenários distintos de incidência da falta: iniciando-se no cruzamento da tensão pelo zero ( $\theta = 0^\circ$ ) e no valor de pico dessa ( $\theta = 90^\circ$ ).

Apresenta-se, na Figura 6.10, o desempenho das funções TD perante a variação de  $\theta$  mencionada tomando como referência as medições obtidas para o relé associado ao terminal local da linha protegida. Para tanto, ilustram-se a corrente réplica e tensão incrementais (DIZLOOP e DVLOOP, respectivamente) bem como os torques e tensões de operação associados às funções TD32 e TD21,  $T_{OP}$  e  $V_{21OP}$ , respectivamente. Enfatiza-se que todas as variáveis apresentadas referem-se ao loop sob falta, ou seja, o AT.

Dos resultados, nota-se que a energia associada aos primeiros instantes do defeito é maior para os cenários de incidência de falta próximo ao pico da tensão, ou seja,  $\theta = 90^\circ$ . Assim,

**Figura 6.10:** Análise pontual de desempenho das funções TD para ângulos de incidência de falta  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ .



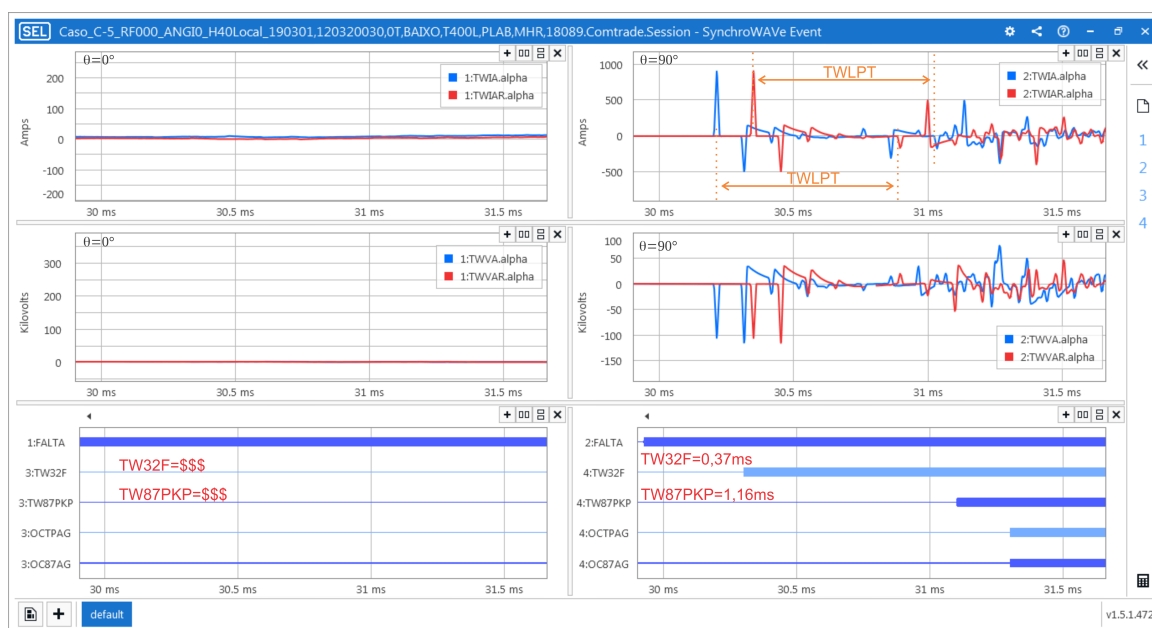
Fonte: Autoria própria.

atuações mais rápidas para as funções TD são obtidas. Todavia, para aqueles casos de faltas menos adversos, tal como para os curtos-circuitos iniciados próximos ao cruzamento da tensão pelo zero, retardos no tempo de operação das funções TD são observados, destacando-se a TD21 como a função mais afetada. De fato, como as características de pré-falta são mantidas inalteradas durante a variação de  $\theta$  imposta, a grandeza de restrição do elemento de distância é preservada em ambos os casos. Conseqüentemente, o retardo observado na variação da grandeza de operação durante os primeiros instantes do distúrbio quando  $\theta = 0^\circ$  contribui para que atuações mais lentas da TD21 sejam obtidas. Além disso, para a TD32, percebe-se que nos primeiros instante do defeito, a potência propagante pelo terminal monitorado é maior para as situações nas quais  $\theta = 90^\circ$ , visto que a energia de curto-circuito observado nos primeiros instantes do defeito é maior para tais casos, justificando-se a TD32 ser mais rápida nesses.

Ilustra-se, na Figura 6.11, o desempenho das funções TW para a variação de  $\theta$  imposta. Para tanto, apresentam-se as OV's de corrente e tensão associadas ao loop sob falta para os terminais local e remoto, TWIA.alpha, TWIAR.alpha, TWVA.alpha e TWVAR.alpha, respectivamente. Dos resultados obtidos, constata-se que OV's não são lançadas no ponto de defeito para situações nas quais a falta se inicia próximo ao cruzamento da tensão pelo zero. De fato, a magnitude das OV's de tensão e corrente incidentes é diretamente proporcional ao  $\sin(\theta)$  (Schweitzer *et*



**Figura 6.11:** Análise pontual de desempenho das funções TW para ângulos de incidência de falta  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ .



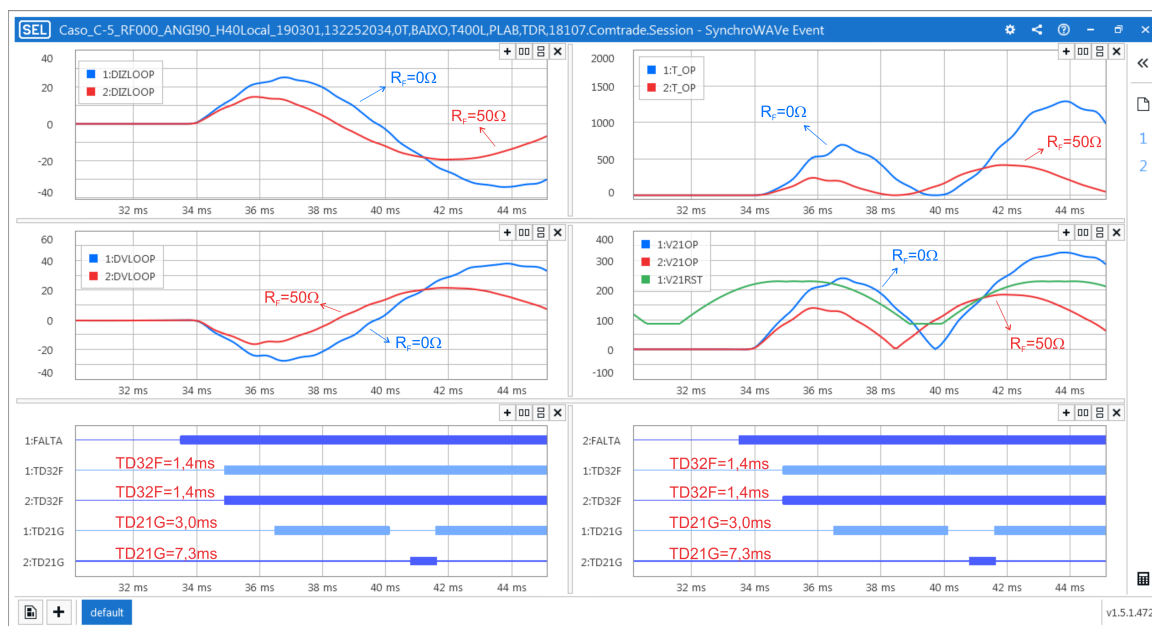
*al.*, 2014b), justificando-se, portanto, os resultados encontrados. Assim sendo, perante essas situações, as funções TW não irão atuar, conforme apresentado na Figura 6.11. Por outro lado, nos casos de transitórios de faltas mais severos, tal como aqueles observados para  $\theta = 90^\circ$ , os quais provocam maior estresse eletromecânico à linha durante os primeiros instantes de falta, as funções TW32 e TW87 atuam rapidamente, acelerando o tempo de atuação final do T400L.

### 6.3.2 A Influência da Resistência de Falta

Um dos parâmetros elétricos mais importantes que ditam a variabilidade dos curtos-circuitos incidentes em sistemas de transmissão é a resistência de falta ( $R_F$ ), a qual determina se as variações decorrentes da falta incidente são classificadas como mais ou menos severas, a depender da magnitude dos sinais de tensão e corrente resultantes. Visando esclarecer o desempenho do relé SEL T400L perante tais cenários, aplica-se uma falta AT em 40% da linha monitorada, tomando como referência o terminal local dessa, incidente no pico da tensão e considerando dois valores distintos de  $R_F$ , a saber:  $R_F = 0 \Omega$  e  $R_F = 50 \Omega$ .

Ilustra-se, na Figura 6.12, o desempenho das funções TD para a variação de resistência de falta considerada, tomando como referência as medições obtidas para o relé associado ao terminal local da linha protegida. Para tanto, apresentam-se as grandezas incrementais de

**Figura 6.12:** Análise pontual de desempenho das funções TD para resistências de falta  $R_F = 0 \Omega$  e  $R_F = 50 \Omega$ .



Fonte: Autoria própria.

corrente e tensão associadas ao loop sob falta (DIZLOOP e DVLOOP, respectivamente) bem como os torques de operação da TD32 e das tensões de operação e restrição da TD21,  $T_{OP}$ ,  $V_{21OP}$  e  $V_{21RST}$ , respectivamente.

Dos resultados destacados, nota-se que a variação de  $R_F$  imposta contribui para que atenuações significativas nas grandezas incrementais de corrente e tensão associadas ocorram. Desse modo, reduz-se majoritariamente as grandezas de operação das funções TD. Ainda que perante a referida situação, o desempenho da TD32 é mantido, graças a utilização de limiares adaptativos, os quais são parcelas do torque esperado para faltas a frente ou reversas ao terminal tomado como referência durante a análise. De fato, comparar o torque de operação com grandezas de restrição que se adaptam à corrente réplica incremental resultante, contribuem para prover sensibilidade e robustez à TD32, conforme apresentado na Figura 6.12.

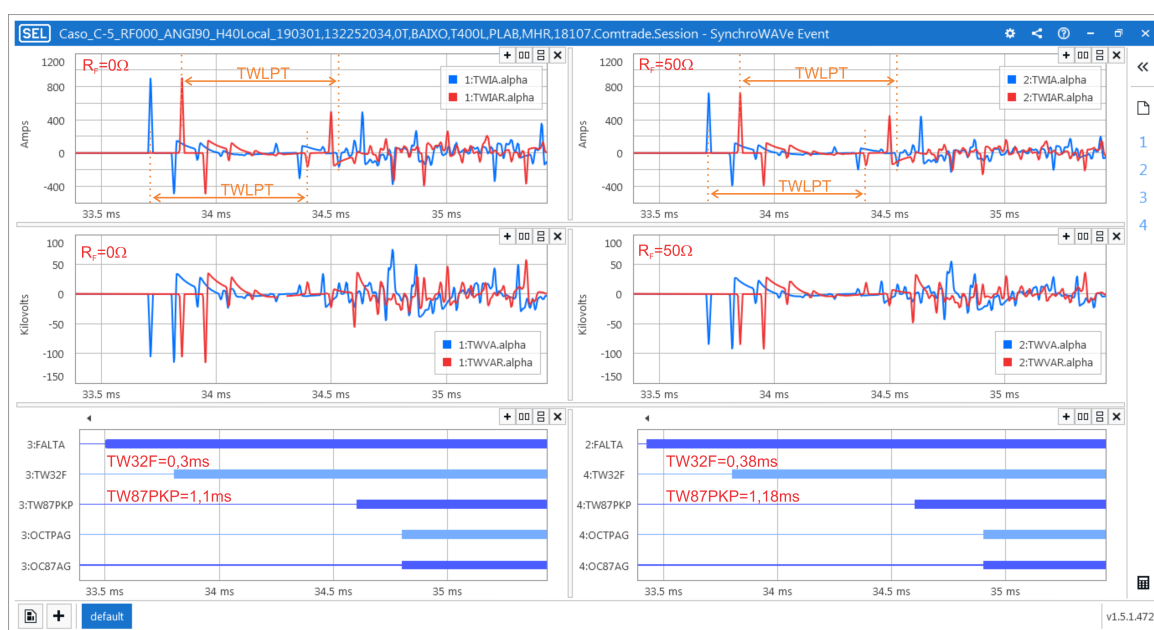
Por outro lado, visto que as características de pré-falta da rede elétrica não são afetadas por  $R_F$ , mantém-se inalterada a variável de restrição da função de distância. Consequentemente, como a tensão de operação é reduzida significativamente com o aumento da resistência de falta, observa-se que  $V_{21OP}$  somente excede a tensão de restrição associada após o primeiro lóbulo de variação da primeira, diferentemente do que acontece quando  $R_F = 0 \Omega$ . Portanto, justifica-se

o atraso considerável observado no tempo de atuação da TD21.

Apresenta-se, na Figura 6.13, o desempenho das funções TW para a variação de  $R_F$  considerada. Para tanto, destacam-se as OV's de corrente e tensão associadas ao loop sob falta para os terminais local e remoto, TWIA.alpha, TWIAR.alpha, TWVA.alpha e TWVAR.alpha, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, percebe-se que a magnitude das primeiras OV's de corrente e tensão incidentes variam com a resistência de falta. De fato, a intensidade das OV's lançadas no ponto de falta é inversamente proporcional à  $R_F$  (Schweitzer *et al.*, 2014b). Ainda que perante a atenuação observada, as magnitudes das OV's incidentes excederam os limiares mínimos de segurança. Assim, afirma-se que, para a análise considerada, as funções TW32 e TW87 foram pouco afetadas pela variação de resistência de falta, diferentemente da TD21, por exemplo.

Por fim, é importante ressaltar o papel crucial que a supervisão por sobrecorrente possui sobre a sensibilidade do relé SEL-T400L, principalmente nas situações de variação da resistência de falta associada ao defeito incidente. O *pickup* dos elementos de sobrecorrente deve ser ajustado de forma a trazer a sensibilidade desejada às funções aplicadas no domínio do tempo. Desse modo, constata-se o papel significativo que a mencionada supervisão possui sobre o

**Figura 6.13:** Análise pontual de desempenho das funções TW para resistências de falta  $R_F = 0 \Omega$  e  $R_F = 50 \Omega$ .



Fonte: Autoria própria.

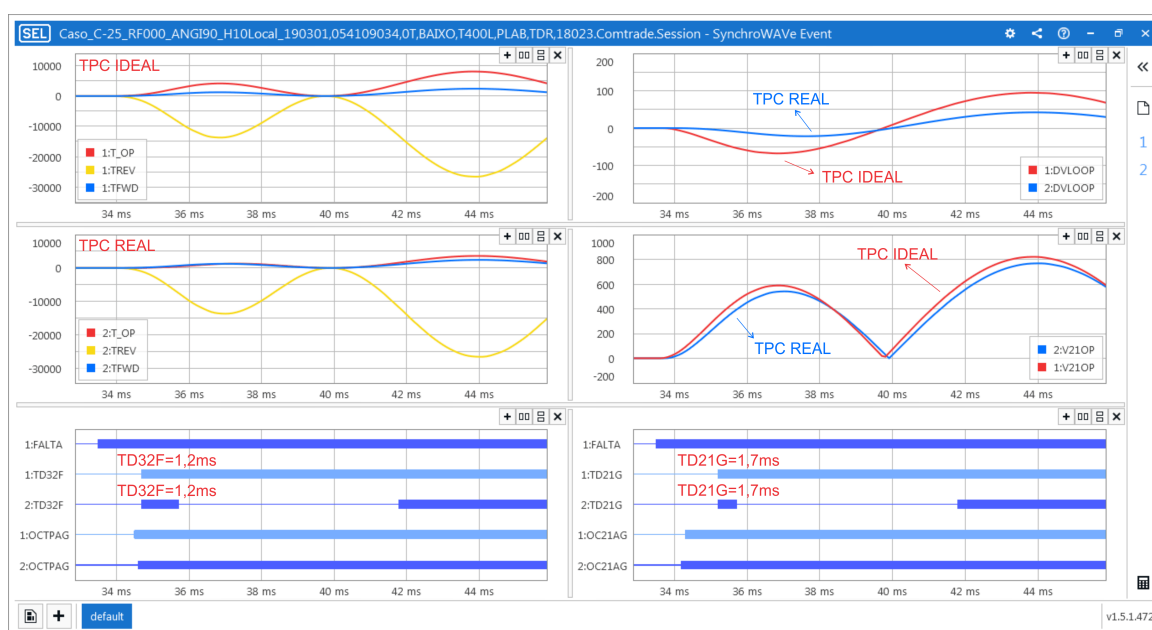
desempenho do equipamento de proteção avaliado.

### 6.3.3 A Influência dos TPCs

Até o presente momento, para o sistema SS1, os sinais de tensão aplicados ao secundário do T400L foram derivados a partir de transformadores para instrumentos ideais, visto que os transitórios eletromagnéticos impostos por esses poderiam influenciar as análises associadas aos parâmetros de falta discutidos anteriormente. Contudo, visando demonstrar a influência que os TPCs possuem sobre o desempenho do relé avaliado, derivaram-se os sinais de tensão a partir de um modelo real de TPC descrito por (Pajuelo *et al.*, 2008).

Apresenta-se, na Figura 6.14, o desempenho das funções TD obtido perante os cenários de aplicação de modelos reais e ideais de TPC, aplicando-se para tanto uma falta AT franca em 40% da linha protegida, tomando como referência o terminal local, incidente no pico da tensão. Dos resultados destacados, constata-se que, embora para o caso em questão, o desempenho das funções TD não tenham sido alterado, visto que o tempo de atuação de ambas foi mantido para os cenários analisados, a atenuação resultante nos sinais de tensão contribuem para uma redução significativa das grandezas de operação das funções TD21 e TD32.

**Figura 6.14:** Análise pontual de desempenho das funções TD perante a influência dos TPCs.

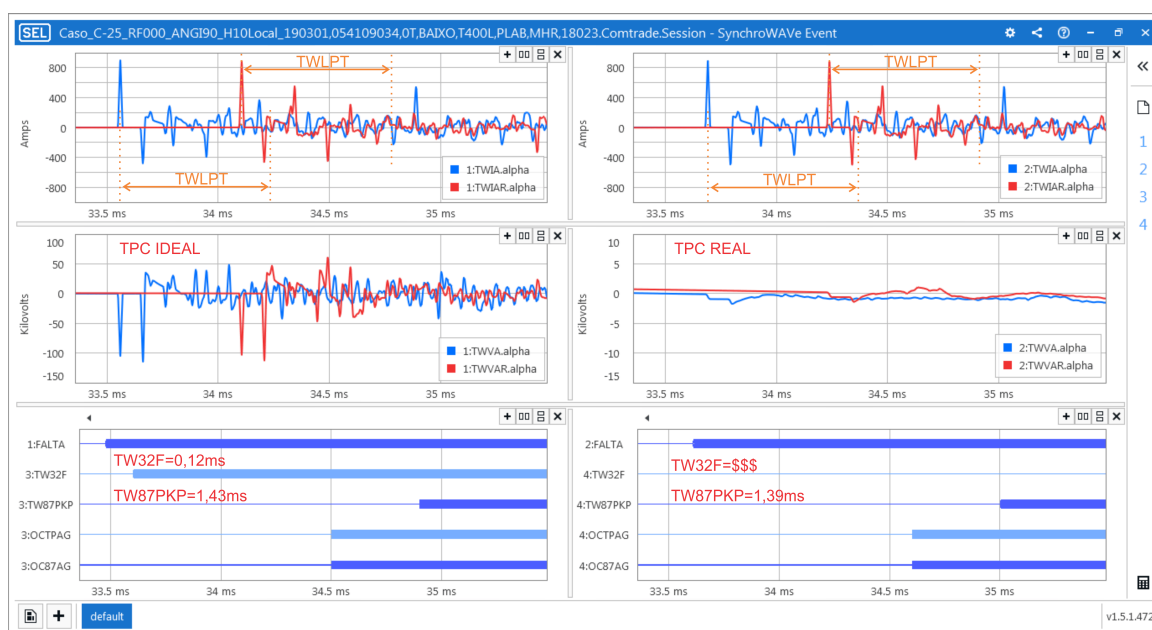


Fonte: Autoria própria.

Após os primeiros instantes de curto-circuito, tanto a função direcional quanto a distância podem ter suas atuações retardadas, a depender do local de aplicação da falta bem como das características dessa, conforme evidenciado pelas indicações das variáveis digitais TD32F e TD21G para o caso em que se considera a aplicação do TPC real. Adicionalmente, enfatiza-se que as atenuações nas tensões impostas pelo TPC nos primeiros instantes de falta podem contribuir para um subbalcance inicial transitório ou até mesmo permanente da TD21, a depender das características associadas à falta bem como ao regime de operação anterior à incidência dessa.

Por outro lado, a análise de desempenho das funções TW perante a influência dos TPCs é apresentada na Figura 6.15. Dos resultados apresentados, percebe-se que o TPC utilizado é responsável por atenuar significativamente a OV de tensão medida pelo relé. Consequentemente, a onda de tensão resultante não possui magnitude suficiente para superar os valores mínimos necessários à ativação do integrador da TW32, restringindo a atuação dessa. De fato, ainda que as capacitâncias parasitas associadas ao reator de compensação e ao transformador abaixador internos aos TPCs permitam a representação dessas no secundário do equipamento, a atenuação resultante pode inviabilizar as indicações da TW32. É por esse motivo que o princípio de operação dessa função direcional tende a se basear apenas nas primeiras OVs de

**Figura 6.15:** Análise pontual de desempenho das funções TW perante a influência dos TPCs.



Fonte: Autoria própria.

tensão incidentes, visto que os TPCs não tendem a inverter a polaridade dessas, mas apenas atenuá-las (Guzmán *et al.*, 2017).

Por fim, o desempenho da TW87 permanece inalterado, uma vez que seu princípio de operação contabiliza apenas as OV's de corrente. Ainda que uma de suas camadas de segurança esteja relacionada à estimação da tensão de polarização (*VPOL*), essa é realizada com base na componente de frequência fundamental, para a qual os TPCs são dimensionados de forma a apresentar ganho unitário e desvio de fase próximos de zero (Saha *et al.*, 2010).

#### 6.3.4 A Influência dos TCs

Idealmente, os transformadores de corrente empregados nos SEEs são projetados para operar sob condições normais de carga, ou seja, na região linear da característica de magnetização do núcleo do equipamento (Saha *et al.*, 2010). Entretanto, para os casos reais de falta, principalmente para aqueles em que se observa elevado conteúdo referente à componente CC de decaimento exponencial, um aumento considerável na corrente de magnetização do transformador pode ocorrer. Como consequência, o núcleo pode saturar e os sinais secundários tornarem-se distorcidos, provocando elevados erros de transformação nas grandezas associadas.

As normas técnicas nacionais e estrangeiras estabelecem que os TCs devem manter a classe de exatidão durante a conversão realizada considerando um fator de sobrecorrente (FS), o qual determina a relação entre a máxima corrente de curto-circuito que pode passar pelo primário do TC e a sua corrente nominal primária sem que ocorra a saturação do núcleo do equipamento. Para as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e IEC (*International Electrotechnical Commission*), o fator de sobrecorrente é considerado como sendo 20.

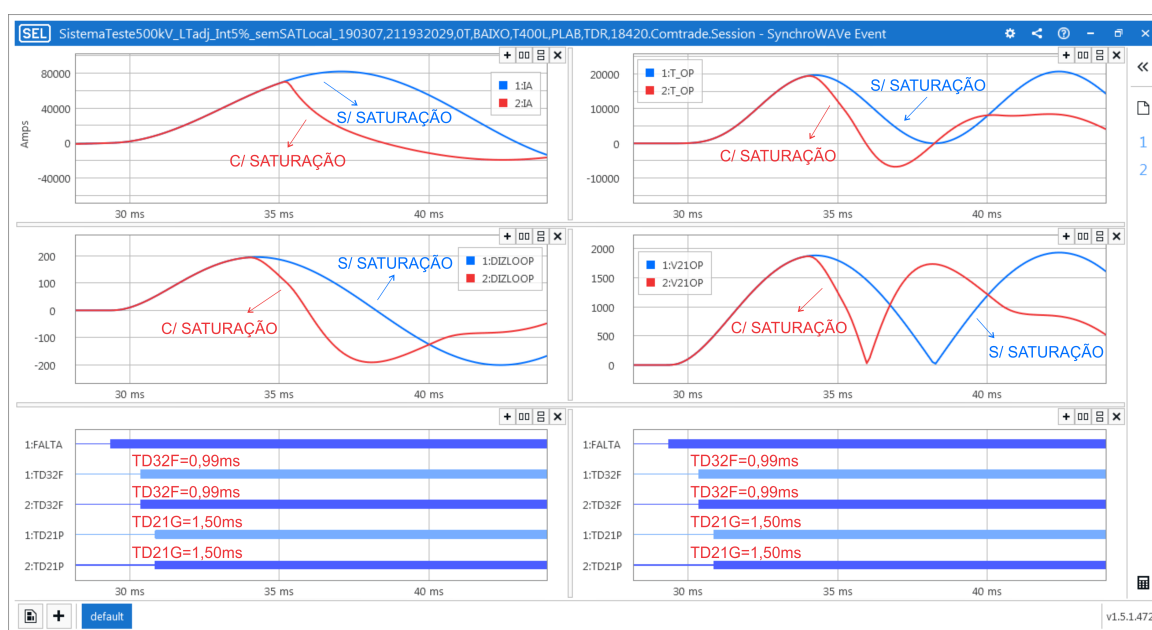
Ainda que FS seja contabilizado, a depender da severidade do curto-circuito incidente, pode-se observar a saturação do TC. Perante tais situações, é largamente divulgado na literatura que as funções tradicionais baseadas em fasores podem ter seu desempenho comprometido, visto que a estimação fasorial resultante será distorcida (Hargrave *et al.*, 2017). Visando elucidar o desempenho do T400L frente tais cenários, aplica-se uma falta trifásica franca em 5% do comprimento da linha protegida, tomando como referência o terminal local, incidente no pico da tensão, com referência à fase A, considerando-se a aplicação de um modelo real de TC

descrito em IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE (2004).

Apresenta-se, na Figura 6.16, o desempenho das funções TD do T400L frente a ocorrência de saturação do TC supracitado. Para tanto, destacam-se as correntes para a fase A, bem como as grandezas incrementais de tensão e corrente (DVLOOP e DIZLOOP, respectivamente) e as tensões e torques de operação associados às funções TD21 e TD32,  $V_{21OP}$  e  $T_{OP}$ , respectivamente. Conforme mencionado por (Schweitzer *et al.*, 2014a), durante faltas trifásicas, quaisquer dos loops bifásicos de falta podem ser sensibilizados. Assim sendo, neste trabalho, optou-se por apresentar os resultados associados ao loop de falta AB.

Tipicamente, nas situações de severa saturação dos transformadores de corrente, distorções nas grandezas secundárias reproduzidas pelo equipamento são observadas a partir de 1/4 de ciclo fundamental após o início do distúrbio (Hargrave *et al.*, 2017), o que é constatado no modelo de TC adotado no presente trabalho, conforme apresentado na Figura 6.16. Como consequência da saturação vigente, a corrente réplica incremental de loop torna-se distorcida, demonstrando que os erros de transformação são expressivos. De fato, DIZLOOP real se distancia em muito do valor esperado. Ainda assim, as funções TD são capazes de atuar antes que as distorções impostas pela saturação do núcleo do transformador incidam sobre as grandezas de operação associadas.

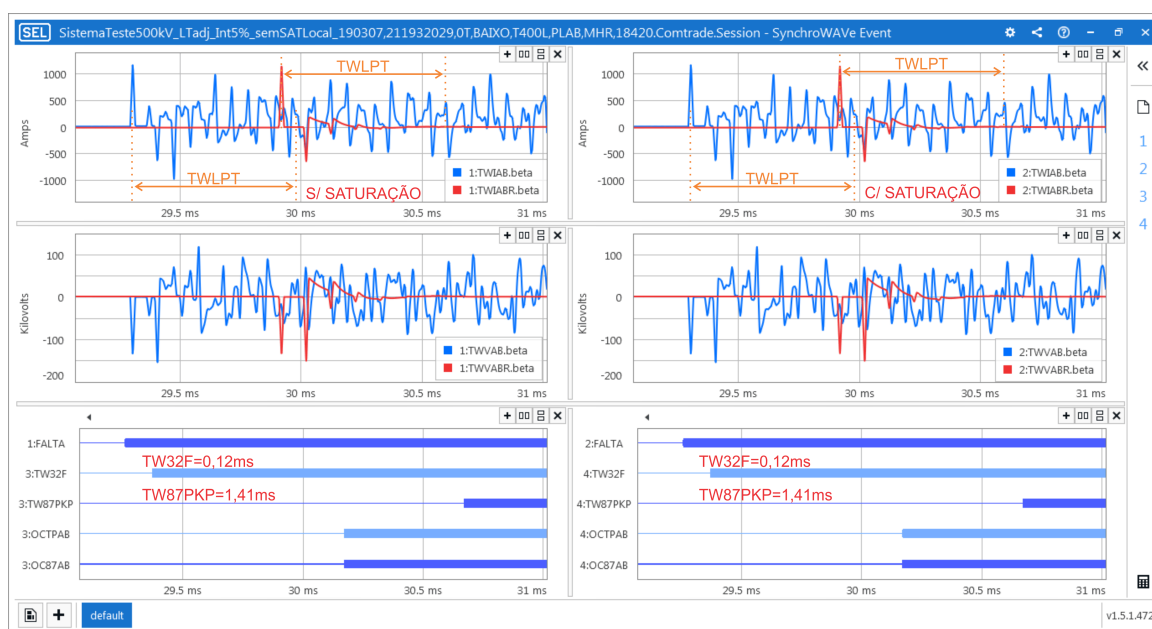
**Figura 6.16:** Análise pontual de desempenho das funções TD perante a influência dos TCs.



Fonte: Autoria própria.

Ilustram-se, na Figura 6.17, as OV's de corrente e tensão para os cenários de saturação de TC. Dos resultados, nota-se que, nos instantes de falta anteriores à saturação do TC, as OV's de corrente são reproduzidas de forma fidedigna. De fato, os transformadores de corrente reais possuem a habilidade de reproduzir fielmente os transitórios de alta frequência sobrepostos à componente fundamental dos sinais de corrente medidos (Guzmán *et al.*, 2017). Portanto, mais uma vez, demonstra-se que as funções de proteção embarcadas no T400L são capazes de atuar antes que as suas grandezas de operação tornem-se distorcidas em decorrência da saturação do TC provocada pela severidade da falta incidente. Por fim, cabe ressaltar que mesmo perante um cenário de *close-in fault*, as funções TW atuaram corretamente.

**Figura 6.17:** Análise pontual de desempenho das funções TW perante a influência dos TCs.



Fonte: Autoria própria.

### 6.3.5 A Necessidade do Relé Companheiro

A partir dos resultados destacados até o presente momento, pode-se concluir que as funções de proteção disponíveis no T400L são rápidas e seguras. Contudo, deve-se ressaltar que tal desempenho é verificado apenas para as situações mais críticas, quando as características dos sinais monitorados deixam evidente a condição de falta na linha. Situações de  $R_F$  elevada bem como faltas iniciadas próximo ao cruzamento da tensão pelo zero afetam significativamente o desempenho da TD21 e das funções TW, respectivamente.

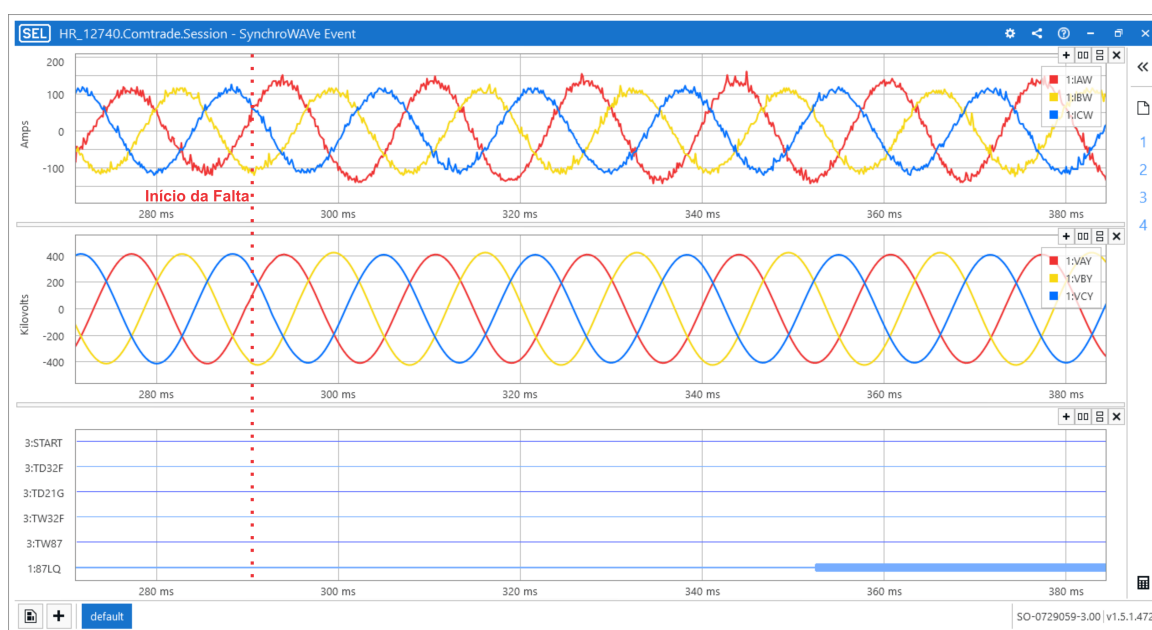


Ainda, havendo a possibilidade de perda do canal de comunicação disposto entre os relés SEL T400L, inviabilizam-se os esquemas de teleproteção do equipamento de tal forma que situações de curto-circuito na linha podem acabar despercebidas por esse dispositivo. Realmente, o fabricante destaca que a intenção 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 as situações menos adversas. Por isso, recomenda-se o uso do relé companheiro, baseado nas funções tradicionais, a ser aplicado em paralelo com o T400L (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Assim, garante-se segurança e confiabilidade para as situações de faltas menos críticas e velocidade para os curtos-circuitos mais preocupantes para a rede elétrica.

Perante o exposto, apresentam-se, na Figura 6.18, as tensões e correntes bem como as *word-bits* de atuação dos relés de proteção empregados, tomando como referência o terminal local da linha protegida, para um caso de falta no qual fica demonstrado a necessidade da aplicação do relé companheiro para manutenção da proteção unitária da linha. Trata-se de uma falta de alta impedância aplicada em 95% da linha monitorada no sistema SS1, tomando como referência o terminal local, em um cenário típico de geração fraca, ou seja, SIR elevado.

Do resultado, constata-se que o relé SEL-T400L não foi capaz de detectar o distúrbio incidente, visto que a variável digital *START* não foi habilitada. Por consequência, inviabiliza-se a

**Figura 6.18:** Demonstração da necessidade do relé companheiro.



**Fonte:** Autoria própria.

atuação de suas funções de proteção, uma vez que essas são liberadas apenas quando satisfeita a lógica do *Starting Element*. Todavia, utilizando-se o relé diferencial de linha SEL-411L como relé companheiro, o qual se baseia na análise de grandezas fasoriais, é possível perceber que a função diferencial de linha baseada na componente de sequência negativa desse equipamento 87LQ é sensibilizada para o presente cenário de falta. Portanto, fica evidenciada a necessidade de aplicação de um relé operando em paralelo com o T400L visando promover a proteção unitária da linha para os casos de falta menos adversos passíveis de ocorrerem nos sistemas elétricos reais.

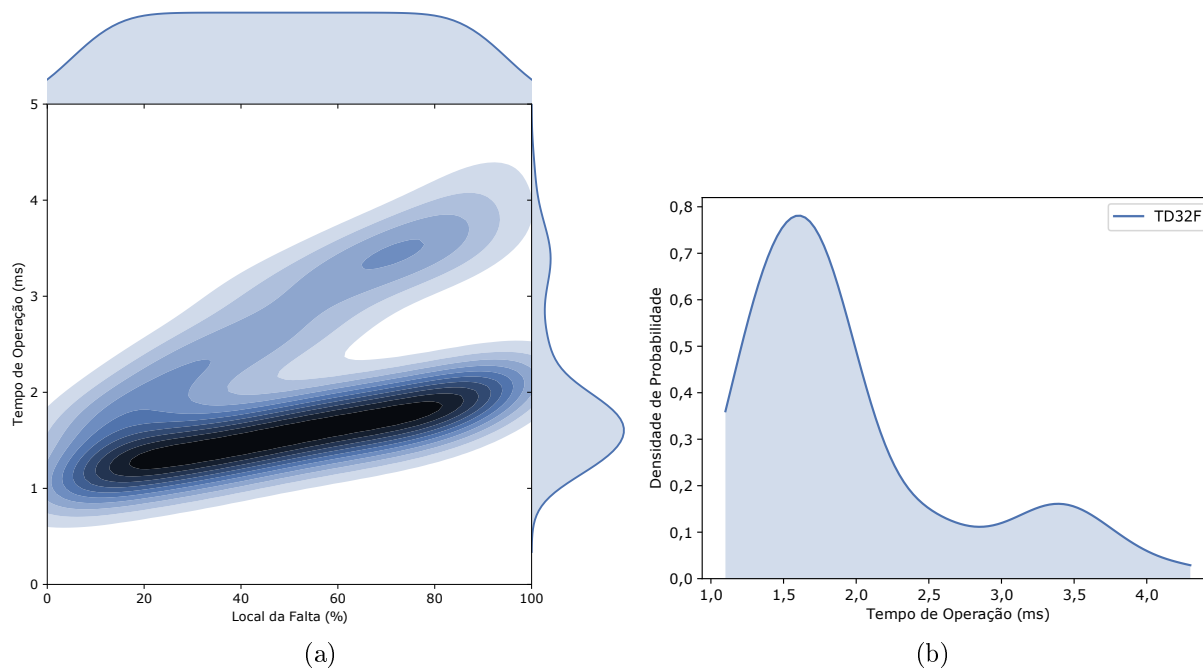
### 6.3.6 O Desempenho do T400L para as Simulações em Massa

Visando trazer uma ideia geral a respeito do desempenho do relé SEL-T400L, simulações em massa foram obtidas a partir da variação de importantes parâmetros de operação da rede elétrica bem como das características de curto-circuito dessa. Para tanto, ângulo de incidência de falta ( $\theta$ ), carregamento da linha ( $\delta$ ), resistência de falta ( $R_F$ ) e local da falta ( $d$ ) foram variados conforme apresentado a seguir:  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  e  $90^\circ$ ;  $\delta = 5^\circ, 15^\circ$  e  $25^\circ$ ;  $R_F = 0 \Omega, 25 \Omega$  e  $50 \Omega$ ; e  $d$  de 0,1 pu a 0,9 pu em passos de 0,1 pu do comprimento da linha. Quanto ao tipo de falta, esse foi sempre AT, visto que, em sistemas de transmissão de 500 kV, representam aproximadamente 93% dos casos totais de falta típicos (Schweitzer *et al.*, 2016). Totaliza-se, portanto, 243 casos de falta para os quais o T400L tem seu desempenho avaliado.

Os resultados serão apresentados sob a forma de superfícies que relacionam tempo de atuação de cada uma das funções com o local de aplicação da falta, tomando como referência o desempenho do relé aplicado ao terminal local da linha monitorada. Combinadas às curvas resultantes, nos eixos das ordenadas e das abscissas, encontram-se, respectivamente, as funções densidade de probabilidade para os tempos de atuação e para o local da falta. Por fim, os tempos de atuação foram contabilizados a partir do instante real de aplicação do curto-circuito, uma vez que para os casos simulados de falta esse é conhecido.

Ilustra-se, na Figura 6.19, o desempenho obtido para a TD32 perante a simulação em massa contabilizada, considerando-se, para tanto, o estado da variável digital TD32F. Dos resultados, conclui-se que a função direcional é capaz de atuar para todo o comprimento da linha, sendo

**Figura 6.19:** Desempenho da TD32: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.



**Fonte:** Autoria própria.

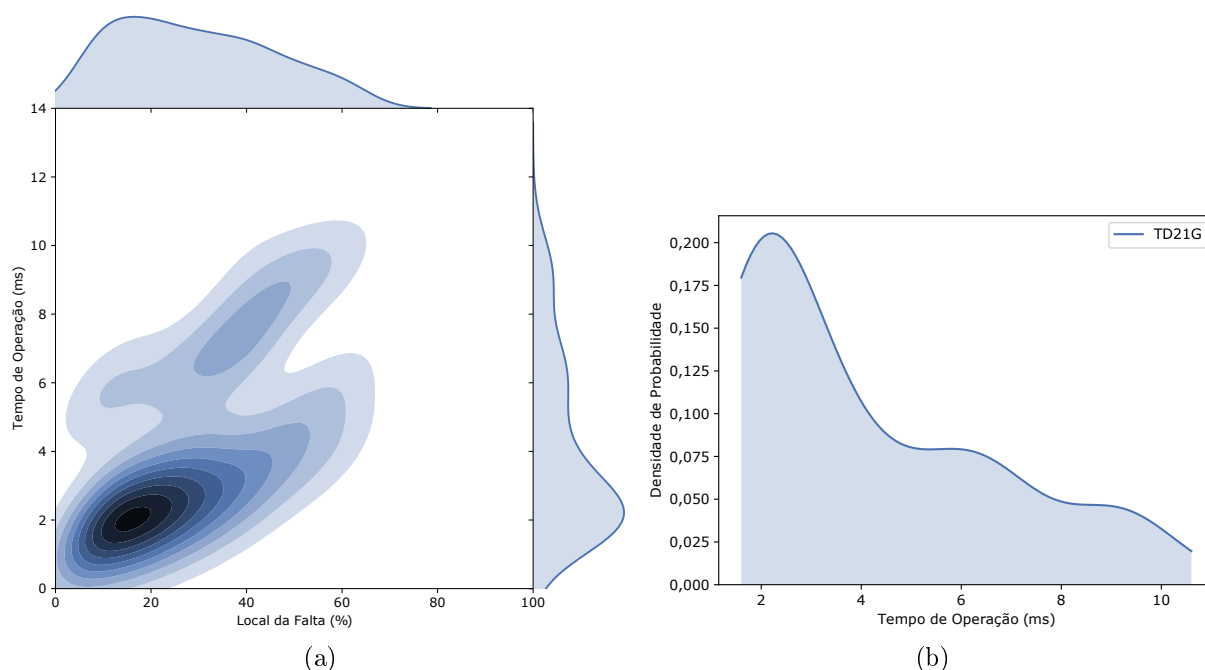
capaz de garantir a proteção unitária da mesma. Além disso, evidencia-se que o tempo de atuação do elemento direcional cresce com a distância da falta. De fato, quão mais distante estiver o distúrbio incidente do terminal monitorado, menores serão os incrementos observados nas tensões e correntes desse terminal devido ao aumento da impedância até o ponto de falta. Adicionalmente, a partir da curva de densidade de probabilidade do tempo de atuação, constata-se que, para os cenários de faltas analisados, a TD32 atua rapidamente para toda a extensão da linha monitorada, concentrando o seu tempo de atuação entre 1 e 2,5 ms.

Para situações de falta mais críticas, tal como aquelas com resistência de falta desprezível e iniciadas no pico da tensão, a elevada energia de curto-circuito observada nos primeiros instantes do defeito garantem à função uma atuação rápida e confiável. Contudo, para as situações menos adversas de curto-circuito, tal como para aqueles iniciados próximos ao cruzamento da tensão pelo zero, tempos de atuação em torno de 4 ms são observados. Ainda assim, nota-se a capacidade da função direcional avaliada de operar em tempos da ordem de 1/4 de ciclo da componente de frequência fundamental, evidenciado a sua rapidez e confiabilidade, visto que para todos os casos de falta analisados essa operou corretamente.

Apresenta-se, na Figura 6.20, o desempenho da TD21 para as simulações em massa realizadas no presente trabalho, considerando-se, para tanto, o estado da *word-bit* TD21G. Conforme demonstrado na Figura 6.21(a), a TD21 é capaz de cobrir faltas ocorridas em apenas uma parcela da linha. Por se constituir um elemento de distância por subalcance, apenas faltas internas à zona de proteção são capazes de sensibilizar, visto que para os cenários de faltas analisados, não se observou nenhum caso de sobrealcance dessa função. Adicionalmente, aproximando-se do alcance da proteção, diminui-se o número de atuações do elemento de distância, uma vez que as tensões de operação e restrição tendem a se aproximar.

Por outro lado, demonstra-se que faltas na primeira metade da linha são detectadas rapidamente, em tempos típicos de até 4 ms. Ainda, quão mais próximo o defeito estiver do terminal monitorado, mais rapidamente esse será identificado pela TD21. Todavia, para os cenários de faltas menos adversos, tal como aqueles que possuem resistência de falta elevada e se iniciam próximo ao cruzamento da tensão pelo zero, bem como com a proximidade da falta ao alcance da proteção, a atuação do elemento de distância é retardada de forma significativa, podendo alcançar tempos maiores que 10 ms. Ainda assim, pode-se dizer que, comparada às funções de distância tradicionais, é capaz de acelerar consideravelmente o disparo de *trip* na linha.

**Figura 6.20:** Desempenho da TD21: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.

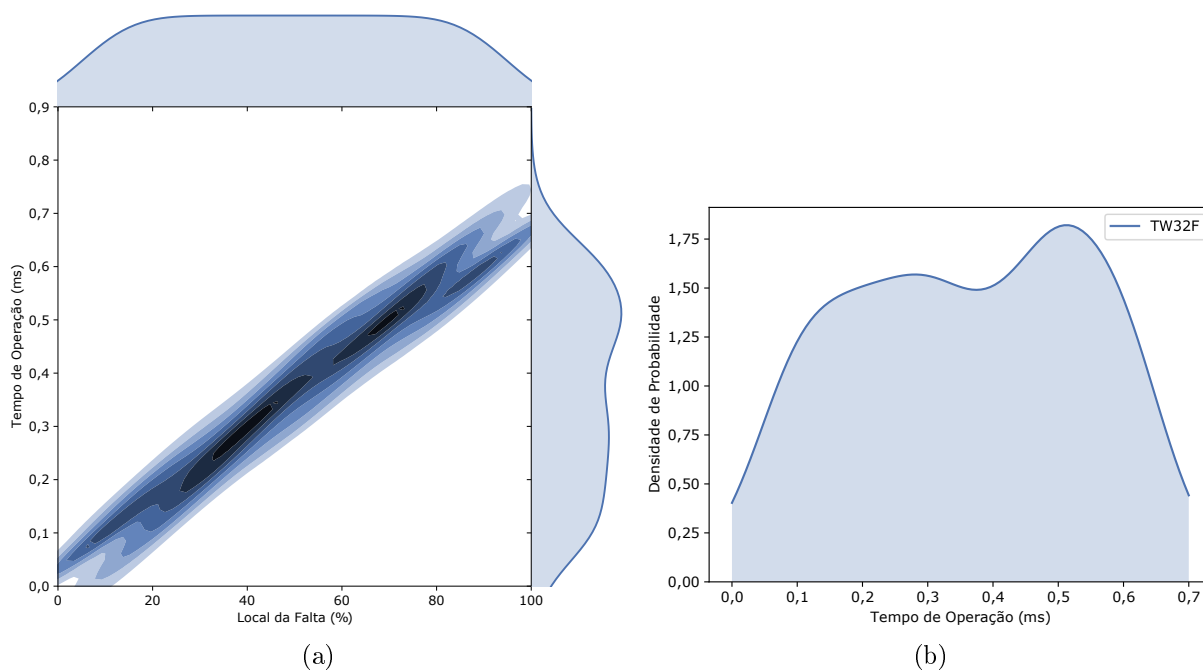


Fonte: Autoria própria.

Por fim, para o total de casos analisados, a atuação da TD21 foi observada em 110 deles. De fato, dos 243 casos de faltas simulados, 54 são externos à zona de proteção do elemento de distância. Portanto, fica evidenciado que a TD21 não é capaz de atuar para todos os casos de falta internos à zona protegida da linha, já que o comando de *trip* foi observado em apenas cerca de 58% do total de casos em que era esperado identificar corretamente o distúrbio. Dessa forma, afirma-se que a proteção de distância embarcada no T400L não é 100% confiável, visto que a depender das condições de pré-falta bem como das características da falta incidente essa pode não operar.

Considerando-se o estado da *word-bit* TW32F, apresenta-se, na Figura 6.21, o desempenho da TW32 para a simulação em massa realizada no presente trabalho. Dos resultados obtidos, quando OV's de corrente e tensão são lançadas na linha, ou seja, para faltas não iniciadas próximas ao cruzamento da tensão pelo zero, demonstra-se que a TW32 é capaz de cobrir toda a linha de transmissão protegida. Considerando apenas transformadores para instrumentos ideais, as OV's de tensão são fielmente reproduzidas e não atenuadas, diferentemente do que ocorre quando da aplicação de TPC's reais. Assim sendo, superam-se os limiares mínimos necessários à ativação do integrador da função, de tal forma que a TW32 rapidamente identifica

**Figura 6.21:** Desempenho da TW32: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.



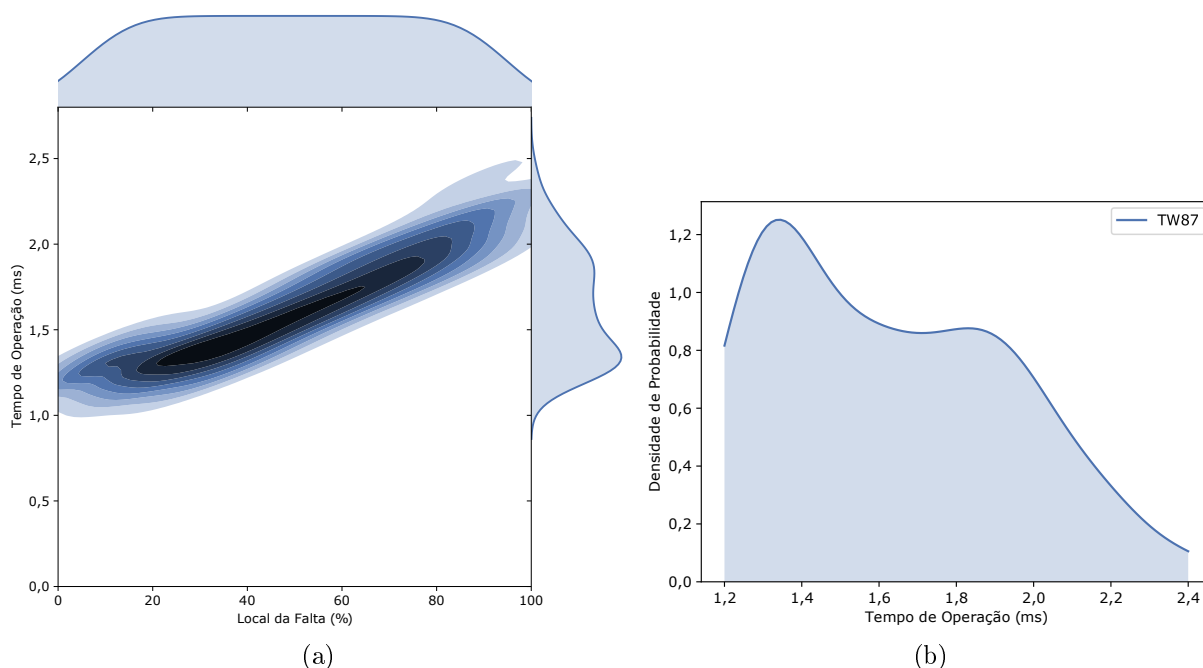
Fonte: Autoria própria.

a falta vigente.

A partir da curva de densidade de probabilidade em função do tempo de atuação apresentada na Figura 6.21, fica demonstrado que o elemento direcional de potência baseado na análise de OVs é capaz de acelerar o disparo do sinal permissivo de atuação no esquema de teleproteção *POTT*, contribuindo para que atuações mais rápidas desse sejam obtidas. Por fim, do total de casos associados a base de dados de curto-circuito referente às simulações em massa contabilizadas, a TW32 não sinalizou os distúrbios incidentes somente quando não deveria, ou seja, nas situações em que OVs não são lançadas na LT ( $\theta \approx 0^\circ$ ), o que representa 33% do total de casos.

O desempenho obtido para a TW87 perante a base de simulação em massa contabilizada no presente trabalho, quando considerando a resposta associada à variável digital TW87, é apresentado na Figura 6.23. Dos resultados, percebe-se que o elemento diferencial cobriu com precisão a linha monitorada em todos os cenários de faltas para as quais deveria atuar, ou seja, todas aquelas não iniciadas próximas ao cruzamento da tensão pelo zero. De fato, OVs de corrente não são lançadas no ponto de falta perante tais situações (Schweitzer *et al.*, 2014b).

**Figura 6.22:** Desempenho da TW87: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.



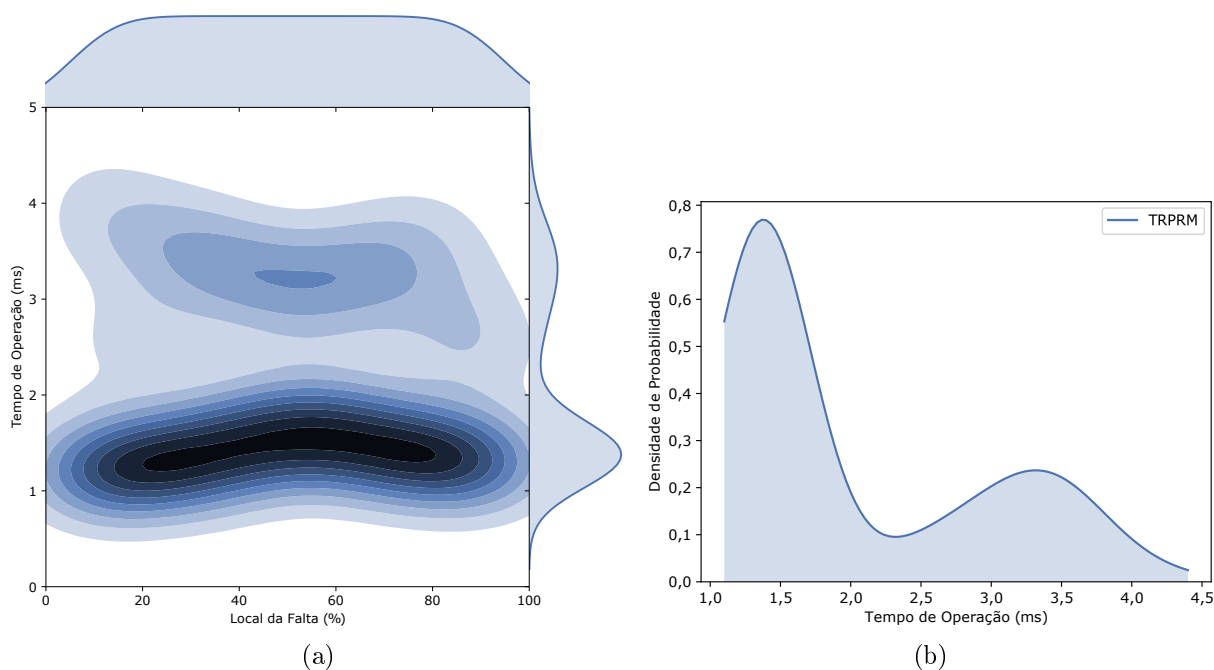
Fonte: Autoria própria.

Embora os tempos de atuação obtidos estejam distribuídos entre 1,2 a 2,4 ms, deve-se ressaltar que esses dependem sumariamente do comprimento da linha protegida, da latência do canal de comunicação associado bem como da resposta dos elementos de sobrecorrente. A partir da curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta, conclui-se que a linearidade dessa é decorrente do comportamento da supervisão por sobrecorrente associada à TW87, uma vez que para as faltas próximas a ambos os terminais da linha, graças ao cálculo da característica de restrição dessa função, espera-se que a variável digital TW87PKP seja habilitada em aproximadamente o dobro do tempo de trânsito da LT, tomando como referência o instante de chegada da primeira OV de corrente ao terminal monitorado.

Por fim, de forma análoga à TW32, para a base de casos de faltas analisada, o elemento diferencial de linha não fora sensibilizado somente nas situações em que realmente não deveria ser, visto que devido às características de falta ( $\theta \approx 0^\circ$ ), OVs de corrente não são lançadas no ponto de falta, representando 33% do total de casos.

Apresenta-se, na Figura 6.23, o desempenho geral obtido para o relé SEL-T400L perante a base de simulações contabilizada. Para tanto, considerou-se o instante associado à habilitação

**Figura 6.23:** Desempenho geral do T400L: (a) Curva de distribuição do tempo de atuação em função do local da falta; (b) Densidade de probabilidade em função do tempo de atuação.



Fonte: Autoria própria.

da variável digital TRPRM, a qual é referente ao momento em que a permissão para energização da bobina do disjuntor é disparada. Neste contexto, TRPRM contabiliza as indicações do esquema diferencial de linha, da TD21 operando em *stand alone*, bem como as atuações dos esquemas de teleproteção *POTT* e *DTT*.

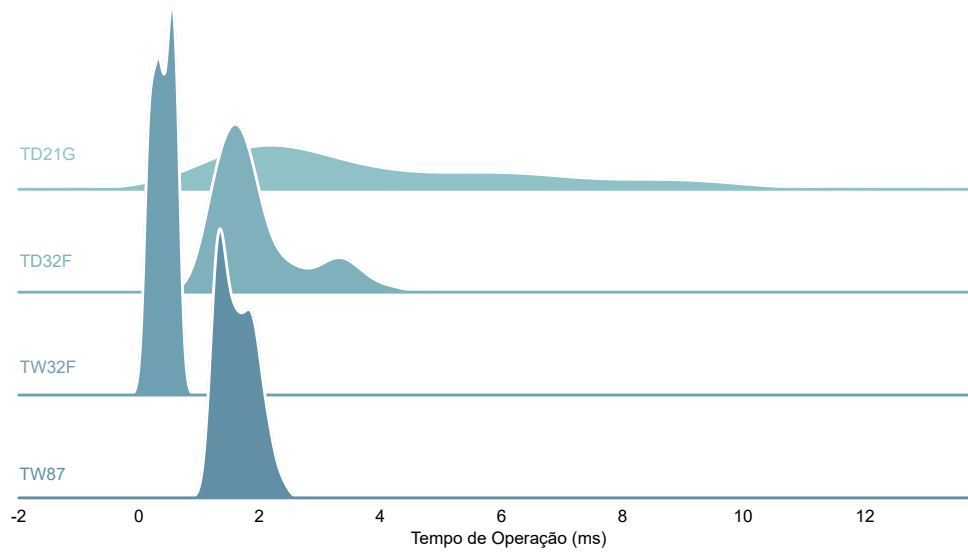
Dos resultados obtidos, nota-se que as funções de proteção embarcadas no T400L se complementam de forma a permitir atuações rápidas ao longo de toda a extensão da linha perante as mais diversas características de falta. Nas situações de falta menos adversas, as funções TD, especialmente o elemento direcional, garantem confiabilidade e robustez ao relé. Por outro lado, nos cenários mais adversos, os quais tendem a comprometer a estabilidade da rede elétrica associada, as funções TW trazem rapidez ao T400L, visto que são capazes de operar dentro de poucos milissegundos após o início do defeito. Portanto, justifica-se, na curva de densidade de probabilidade apresentada na Figura 6.23, os dois picos em torno dos quais se concentram os tempos de atuação típicos para o dispositivo avaliado perante a base de simulações considerada neste trabalho: o primeiro refere-se às atuações para os cenários mais adversos de falta, enquanto que o segundo, associado à resposta das funções TD para os menos severos.

Por fim, fica confirmado que o T400L, quando comparado ao desempenho dos relés de proteção tradicionais, é capaz de acelerar significativamente o tempo de atuação associado quando se tratando da proteção de LTs, atuando em tempos típicos médios da ordem de 1/4 de ciclo da componente fundamental.

Ademais, ilustra-se, na Figura 6.24, a comparação entre os tempos de atuação das funções de proteção embarcadas no T400L para a simulação em massa contabilizada no presente trabalho desconsiderando-se o atraso do canal de comunicação. Denominando-a 'corrida' das funções, constata-se que as mais rápidas são aquelas baseadas na análise de OV's. De fato, havendo no *hardware* associado aos dispositivos de proteção capacidade de processamento suficiente para analisar os transitórios de alta frequência, os ganhos em tempo de operação são significativos, principalmente para os cenários de falta mais adversos, os quais tendem a comprometer a estabilidade da rede elétrica. Por fim, intrinsecamente mais lentas são as funções TD, todavia expressivamente mais rápidas que as proteções tradicionais baseadas em fasores. Neste contexto, os tempos de atuação associadas às funções TD são retardados para as situações de faltas menos adversas, ao custo de manutenção da segurança e confiabilidade das atuações associadas.



**Figura 6.24:** Comparação entre os tempos de atuação das funções de proteção embarcadas no T400L.



**Fonte:** Autoria própria.

# CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma nova tendência no mercado de proteção de linhas de transmissão: as funções de proteção baseadas no domínio do tempo disponíveis no relé SEL-T400L, fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*. 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 T400L. São notórios os ganhos financeiros associados à possibilidade de aumento das margens de estabilidade dos sistemas elétricos em detrimento da construção de novas linhas de transmissão frente à demanda crescente por energia elétrica.

Sabe-se que, devido às limitações impostas pelo processo de estimação fasorial, os sistemas de proteção tradicionais apresentam um atraso intrínseco no tempo de atuação. Com o intuito de superar as limitações das funções tradicionais, os algoritmos aplicados no domínio do tempo processam as amostras instantâneas dos sinais medidos, surgindo como possibilidade para o aumento da potência transferida, mantendo-se seguras as margens de estabilidade do SEE desde que garantida a atuação rápida do esquema de proteção associado.

As funções de proteção no domínio do tempo disponíveis no relé SEL-T400L baseiam-se na análise de ondas viajantes e de 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 em LTs (TW87).

Inicialmente, o desempenho do relé SEL-T400L foi apresentado para casos reais de falta provenientes de uma linha de transmissão sob concessão da Eletronorte (ELN), a qual, durante o período de 01/06/2016 a 30/06/2017, observou 34 ocorrências de desligamentos forçados. Visando demonstrar os benefícios da aplicação da proteção no domínio do tempo em relação às proteções tradicionais baseadas em fasores atualmente encarregadas de proteger a linha

monitorada, para um total de oito casos reais de falta obtidos com a ELN, comparou-se o desempenho do T400L com o dos equipamentos atualmente aplicados à linha protegida. Dos resultados, comprovou-se que reduções médias da ordem de 17 ms são obtidas no tempo de atuação final dos equipamentos de proteção quando da aplicação do SEL-T400L. Além disso, mesmo perante cenários de energização de linhas adjacentes e faltas incidentes em LTs paralelas à monitorada, o T400L manteve-se seguro, não emitindo um falso comando de *trip*. De fato, tão importante quanto atuar corretamente é restringir a operação quando a situação assim determinar.

Adicionalmente, o desempenho do T400L também foi obtido quando empregado na proteção de importante sistema de transmissão responsável por interligar os subsistemas norte e sul do SIN. Trata-se de uma linha de transmissão com compensação série interna e externa modelada em ATP. Dos resultados, notou-se que, mesmo perante a influência das componentes de frequência subsíncronas associadas aos bancos de capacitores presentes na linha, o T400L foi capaz de prover atuações rápidas e seguras no sistema. Ademais, demonstrou-se que o presente equipamento é capaz de processar as informações associadas aos transitórios eletromagnéticos contidos em uma faixa espectral ainda desconhecida por grande parte dos relés de proteção reais, possibilitando análises até então inexistentes, tal como o estudo de transitórios eletromagnéticos associados à energização de LTs.

Por fim, importantes parâmetros de operação e das características de faltas de uma rede elétrica simplificada modelada em ATP foram variados de forma a resultar em uma base de dados com 243 casos de faltas. Em resumo, foram variadas resistência, ângulo de incidência e local da falta, bem como o carregamento da linha. Destacaram-se casos pontuais de falta para os quais mostrou-se a influência que os transformadores para instrumentos, resistência e ângulo de incidência de falta possuem sobre o desempenho do T400L.

Dos resultados obtidos, demonstrou-se que as funções TW não atuam para faltas iniciadas próximas ao cruzamento da tensão pelo zero. De fato, perante tais situações, OV de tensão e corrente não são lançadas no ponto de defeito. Ainda, as função TD tiveram suas atuações retardadas quando comparadas aos curtos-circuitos iniciados no pico da tensão, visto que a energia de curto-circuito associada aos primeiros instantes de falta é reduzida de forma expressiva. Por outro lado, quanto à variação da resistência de falta, ficou evidenciado que a TD21 é

a função mais afetada, já que atrasos significativos em seu tempo de atuação foram observados.

Quanto aos sinais de tensão provenientes dos TPCs, constatou-se que, ainda que as capacitâncias parasitas associadas ao transformador abaixador interno e ao reator de compensação permitam a representação das OV's de tensão no secundário do equipamento, essas são demasiadamente atenuadas. Assim sendo, demonstrou-se que, a depender da característica da falta incidente, a TW32 pode não operar, bem como as funções TD podem ser retardadas. Ainda neste contexto, comprovou-se que a TD21, tomando como referência o alcance de sua zona de proteção, pode ter sua resposta subalcançada. Por fim, para os casos de saturação de TC mais adversos, nos quais distorções nos sinais secundários já são observadas 1/4 de ciclo fundamental após o início do defeito, atestou-se que as atuações rápidas das funções de proteção embarcadas no T400L tornam-as imunes a essa indesejável, mas bastante comum característica associada aos transformadores de corrente.

Por outro lado, sintetizando a base de dados resultante, foi possível obter uma visão geral do desempenho do T400L bem como de suas funções de proteção de forma isolada. Dos resultados, a partir da 'corrida' das funções aplicadas no domínio do tempo, constatou-se que as mais rápidas são aquelas baseadas na análise de OV's. De fato, havendo no *hardware* associado aos dispositivos de proteção capacidade de processamento suficiente para analisar os transitórios de alta frequência, os ganhos em tempo de operação são significativos, principalmente para os cenários de falta mais adversos, os quais tendem a comprometer a estabilidade da rede elétrica. Por fim, intrinsecamente mais lentas são as funções TD, todavia expressivamente mais rápidas que as proteções tradicionais baseadas em fasores. Assim, os tempos de atuação associadas às funções TD são retardados para as situações de faltas menos adversas, ao custo de manutenção da segurança e confiabilidade das atuações associadas.

Também a partir das simulações em massa, ficou comprovada a dependência da disponibilidade do canal de comunicação para manutenção da segurança do T400L, visto que a TD21 (única função que pode operar no esquema *stand-alone*) não foi capaz de identificar corretamente todas as faltas internas a sua zona de proteção. Ademais, uma fibra ótica dedicada é necessária para habilitação do esquema diferencial disponível no equipamento, visto que tal esquema é dependente de preciso alinhamento de amostras obtidas em ambos os terminais da linha monitorada.

Diante do apresentado neste trabalho, pode-se concluir que as funções de proteção disponíveis no T400L são seguras, rápidas 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 linha. 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 bem como para os cenários de faltas externas à linha monitorada. 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 associada.

Portanto, comparando-se os relés de proteção aplicados no domínio do tempo com aqueles aplicados no domínio fasorial, destacam-se como principais vantagens dos primeiros a velocidade e a faixa espectral de análise dos sinais monitorados, a qual permite estudos de importantes fenômenos associados aos sistemas elétricos de potência, tal como as faltas proeminentes. Como limitações, destacam-se a necessidade do relé companheiro e os investimentos elevados para aplicação da tecnologia.

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

- Avaliar o desempenho do T400L perante cenários de faltas evolutivas e oscilações de potência nos sistemas elétricos de potência;
- Avaliar o comportamento das funções de proteção embarcadas no T400L quando aplicadas em LTs com múltiplos terminais;
- Avaliar o desempenho do T400L quando aplicado em linhas de transmissão híbridas;
- Determinar os limites de sensibilidade paramétrica associados ao T400L;
- Avaliar o desempenho do T400L para simulações em massa considerando o efeito do canal de comunicação;
- Análise de sensibilidade de ajustes;
- Identificar o efeito das terminações da linha sobre o desempenho do dispositivo de proteção avaliado neste trabalho;

- Determinar o impacto que as incertezas nos parâmetros da linha monitorada possuem sobre desempenho do T400L;
- Identificar quais são os benefícios que a compensação da resposta em frequência dos TPCs possuem sobre as funções de proteção embarcadas no T400L;
- Estudar o impacto da influência do efeito capacitivo das linhas de transmissão sobre o desempenho do T400L.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abboud, R.; Dolezilek, D. Case study of time-domain protection: Field-proven benefits to protection, control, and monitoring. In: *International Conference and Exhibition - Relay Protection and Automation for Electric Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 3.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Análise: desligamentos forçados do sistema de transmissão*. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+de+An%C3%A1lise+de+Desligamentos+For%C3%A7ados+do+Sistema+de+Transmiss%C3%A3o+-+Edi%C3%A7%C3%A3o+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>>. Citado 2 vezes nas páginas 61 and 63.

Altuve, H.; Schweitzer, E. *Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems*. Schweitzer Engineering Laboratories, 2010. ISBN 9780972502634. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=URb7RAAACA AJ>>. Citado na página 18.

Anderson, P. *Power System Protection*. McGraw-Hill, 1999. (IEEE Press power engineering series). ISBN 9780071343237. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=eP9qQgAACA AJ>>. Citado na página 18.

Anderson, P. M.; Fouad, A. A. *Power System Control and Stability*. 2. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. Citado na página 3.

ASEA BROWN BOVERI. *Ultra High Speed Relay Type RALDA for EHV/UHV Transmission Line*. [S.l.], 1978. Citado na página 10.

BENMOUYAL, G. Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 10, n. 2, p. 621–630, Apr 1995. Citado na página 28.

Bewley, L. V. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 50, n. 2, p. 532–550, June 1931. ISSN 0096-3860. Citado na página 11.

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, n. 6, p. 2104–2116, Nov 1978. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 10.

Coury, D. V.; Oleskovicz, M.; Giovanini, R. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. São Carlos, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007. Citado na página 2.

Crossley, P. A.; McLaren, P. G. Distance protection based on travelling waves. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, n. 9, p. 2971–2983, Sep. 1983. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 12.

- Custodio, E. A.; Lopes, F. V.; Ribeiro, J. P. G. Ccvt impact on the td21 function security. In: *2017 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. Citado na página 13.
- 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 na página 11.
- Dzienis, C.; Kereit, M.; Blumschein, J.; Claus, M. An experimental analysis of high-speed-distance protection. In: *2010 Modern Electric Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8. Citado na página 13.
- Eastvedt, R. The need for ultra-fast fault clearing. In: *Third Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 1976. Citado na página 3.
- 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](http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Estudos_27.aspx)>. Citado na página 1.
- Felce, A.; Matas, G.; Da Silva, Y. Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors. In: *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 4, p. 2573–2578 vol.4. ISSN 0197-2618. Citado na página 3.
- 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 13.
- GE GENERAL ELECTRIC. *L60 Line Phase Comparison System*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/l60.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 13.
- Glover, J. D.; Sarma, M. S.; Overbye, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. USA: CL - Engineering, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 3, 39, 45, and 50.
- Greenwood, A. *Electrical Transients in Power Systems*. Wiley, 1971. ISBN 9780471326502. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9-4iAAAAMAAJ>>. Citado na página 18.
- Guzmán, A.; Mynam, M.; Skendzic, V.; Eternod, J. L. Directional elements - how fast can they be? In: *44th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 97, and 99.
- Hargrave, A.; Thompson, M. J.; Heilman, B. Beyond the knee point: A practical guide to ct saturation. In: *44th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 97 and 98.
- 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 na página 69.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. *EMTP Reference Models for Transmission Line Raley Testing*. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://www.pes-psrc.org/>>. Citado 2 vezes nas páginas 64 and 98.



- Irwin, J.; Nelms, R. *Basic Engineering Circuit Analysis*. John Wiley & Sons, 2010. (Wiley Plus Products Series). ISBN 9780470633229. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=E4O662eBIu8C>>. Citado na página 20.
- Johns, A. New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of ehv transmission lines. *IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution*, The Institution of Electrical Engineers, v. 127, 1980. Citado na página 11.
- Kasztenny, B.; Guzmán, A.; Fischer, N.; Mynam, M. V.; 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 15 vezes nas páginas 22, 42, 69, 119, 120, 121, 122, 126, 127, 128, 129, 130, 132, 133, and 135.
- Kasztenny, B.; Voloh, I.; Udren, E. Rebirth of the phase comparison line protection principle. In: *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 12.
- Lanz, O. E.; Hanggli, M.; Bacchini, G.; Engler, F. Transient signals and their processing in an ultra high-speed directional relay for ehv/uhv transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n. 6, p. 1463–1473, June 1985. ISSN 0018-9510. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10, and 11.
- Lopes, F. V. *Localização de Faltas 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 na página 17.
- Lopes, F. V.; Leite Jr., E. J. S.; Ribeiro, J. P. G.; Lopes, L.; Piardi, A.; Otto, R.; Neves, W. Using the differentiator-smoother filter to analyze traveling waves on transmission lines: Fundamentals, settings and implementation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS (IPST 2019). Perpignan, France, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 24 and 26.
- Lopes, F. V.; Ribeiro, J. P. G.; Leite, E. J. S.; Silva, K. M. Parametric analysis of the travelling wave-based differential protection tw87. *The Journal of Engineering*, v. 2018, n. 15, p. 1297–1302, 2018. ISSN 2051-3305. Citado na página 16.
- Lopes, F. V.; Silva, K. M.; Costa, F. B.; Neves, W. L. A.; Fernandes, D. Real-time traveling-wave-based fault location using two-terminal unsynchronized data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, n. 3, p. 1067–1076, June 2015. ISSN 0885-8977. Citado na página 12.
- 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*. Brasília, Brasil: [s.n.], 2016. Citado na página 13.
- Metzger, N.; Carstens, B.; Heleniak, F. Practical experience with ultra-high-speed line protective relays. In: *45th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 86.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 11.2: Avaliação Estatística de desligamentos forçados e de desempenho dos sistemas de proteção*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Citado na página 2.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.4: Requisitos mínimos para linhas de transmissão*. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Citado 2 vezes nas páginas 61 and 63.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção*. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Citado na página 2.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Plano de Ampliações e Reforços nas Instalações de Transmissão do SIN*. [S.l.], 2019. Citado na página 1.

Pajuelo, E.; Ramakrishna, G.; Sachdev, M. S. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 2, n. 4, p. 588–599, July 2008. Citado 2 vezes nas páginas 64 and 95.

Phadke, A. G.; Thorp, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd. ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 2, 9, and 19.

Ribeiro, J. P. G.; Lopes, F. V. Modelling and simulation of a time-domain line protection relay. *The Journal of Engineering*, v. 2018, n. 15, p. 861–865, 2018. ISSN 2051-3305. Citado na página 16.

Ribeiro, J. P. G.; Lopes, F. V. Time-domain protection elements: Study and implementation. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 16.

RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V.; LEITE JR., E. J. S. 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, Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 and 121.

Saha, M. M.; Izykowski, J.; Rosolowski, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8. Citado 5 vezes nas páginas 18, 22, 63, 97, and 131.

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 3, 9, 14, 20, 28, 34, 98, and 124.

Schweitzer, E. O.; Guzmán, A.; Mynam, M. V.; Skendzic, V.; Kasztenny, B.; Marx, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 95–110. Citado 6 vezes nas páginas 23, 52, 92, 94, 105, and 132.

Schweitzer, E. O.; Hou, D. *Filtering for Protective Relays*. Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 3 and 9.

Schweitzer, E. O.; Kasztenny, B.; Mynam, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: *69th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–17. ISSN 2474-9753. Citado 10 vezes nas páginas 9, 14, 15, 21, 35, 41, 43, 44, 48, and 78.

- Schweitzer, E. O.; Kasztenny, B.; Mynam, M. V.; 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 5 vezes nas páginas 16, 77, 84, 101, and 130.
- Schweitzer, E. O.; Roberts, J. Distance relay element design. In: *46th ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS*. Texas, USA, 1993. Citado na página 9.
- Schweitzer, E. O.; Skendzic, V.; Guzmán, A.; Mynam, M. V.; Eternod, J. L.; Gong, Y. Five surprises discovered with megahertz sampling and traveling-wave data analysis. In: *45th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 15.
- SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay, Traveling Wave Fault Locator, High Resolution Event Recorder*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://selinc.com/promotional/SEL-T400L/>>. Citado 37 vezes nas páginas 2, 4, 14, 18, 19, 21, 22, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 39, 40, 43, 44, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 65, 100, 126, 127, 128, and 136.
- Sharma, S.; Mynam, M. V. Field experience with an ultra-high-speed line relay and traveling-wave fault locator. In: *45th Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 16.
- Takagi, T.; Barbar, J.; Katsuhiko, U.; Sakaguchi, T. Fault protection based on travelling wave theory, part i: Theory. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, IEEE, Paper A77, July. 1977. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 12.
- 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 11 and 12.
- 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, n. 1, p. 163–173, Jan 1981. ISSN 0018-9510. Citado na página 10.
- Yee, M. T.; Esztergalyos, J. Ultra high speed relay for ehv/uhv transmission lines – installation-staged fault tests and operational experience. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, n. 5, p. 1814–1825, Sep. 1978. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 10.
- ZANETTA Jr., L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Edusp, 2003. Citado na página 17.
- ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Berlin, Germany: Siemens, 2010. Citado na página 130.

## APÊNDICE A

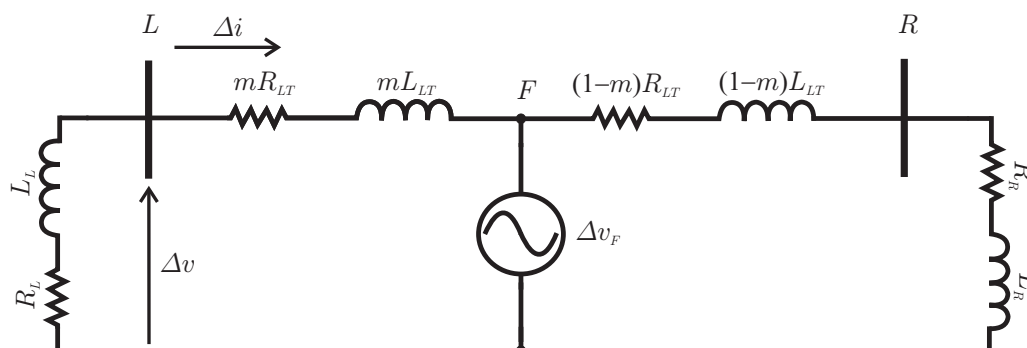
# DERIVAÇÃO DA CORRENTE RÉPLICA INCREMENTAL E CONSIDERAÇÕES PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS

Conforme mencionado ao longo deste trabalho, a corrente réplica incremental possibilita que as funções de proteção baseadas em grandezas incrementais tenham suas relações entre tensões e correntes simplificadas (Kasztenny *et al.*, 2016). Portanto, apresenta-se inicialmente neste apêndice a derivação da corrente réplica para sistemas monofásicos e, em seguida, para os sistemas trifásicos de potência, são obtidas as grandezas incrementais de *loop*.

### A.1 CONSIDERAÇÕES PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS

Apresenta-se na Figura A.1 o circuito puro de falta, o qual pode ser considerado, visto que apenas grandezas incrementais são analisadas. Por questões de simplificação, um sistema monofásico RL modelado a parâmetros concentrados é adotado, assumindo que as impedâncias conectadas às barras local e remota ( $L$  e  $R$ , respectivamente) representam as impedâncias equivalentes de Thévenin que modelam os sistemas adjacentes à LT em estudo.

**Figura A.1:** Circuito puro de falta e as relações entre tensão e corrente incrementais.



Fonte: Autoria própria.

Assumindo que relés de proteção se encontram instalados em ambos os terminais da linha, para o terminal  $L$ , a tensão e corrente incrementais são relacionadas conforme apresentado a

seguir:

$$\Delta v = - \left( R_L \cdot \Delta i + L_L \cdot \frac{d}{dt} \Delta i \right) \quad (\text{A.1})$$

A equação (A.1) pode ser simplificada, sem perda de generalidade, por meio da normalização da expressão pela magnitude da impedância RL conectada à barra L e que modela os sistemas adjacentes à LT, resultando em:

$$\Delta v = -|Z_L| \cdot \left( \frac{R_L}{|Z_L|} \cdot \Delta i + \frac{L_L}{|Z_L|} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i \right) \quad (\text{A.2})$$

Portanto, (A.2) inclui um sinal de corrente composto pela combinação entre a corrente incremental e sua derivada. Esse sinal de corrente é denominado corrente réplica incremental ( $\Delta i_Z$ ) e, matematicamente, pode ser modelado da seguinte forma:

$$\Delta i_Z = \left( \frac{R_L}{|Z_L|} \cdot \Delta i + \frac{L_L}{|Z_L|} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i \right) = D_0 \cdot \Delta i + D_1 \cdot \frac{d}{dt} \Delta i, \quad (\text{A.3})$$

onde:

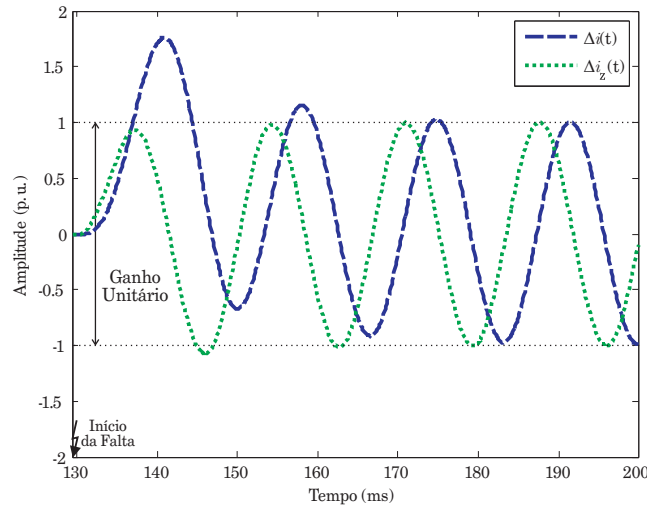
$$D_0 = \frac{R_L}{|Z_L|} \quad (\text{A.4a})$$

$$D_1 = \frac{L_L}{|Z_L|} \quad (\text{A.4b})$$

Dessa forma, utilizando-se de  $\Delta i_Z$ , simplifica-se a relação entre as grandezas incrementais no terminal L, conforme apresentado em (A.5). Destaca-se que a derivação apresentada somente é válida para representações RL de sistemas elétricos. Portanto, é por isso que as grandezas incrementais obtidas durante o processamento de sinais do T400L, anteriormente à utilização dessas pelas funções TD de proteção, são aplicadas a filtros passa-baixas, visando à eliminar as componentes de frequência associadas às capacitâncias da LT monitorada. Dessa forma, possibilita-se a modelagem dessa por meio de representações RL (Kasztenny *et al.*, 2016).

$$\Delta v = -|Z_L| \cdot \Delta i_Z \quad (\text{A.5})$$

Efetivamente, a corrente réplica representa a queda de tensão ao longo de um circuito RL com ganho unitário na frequência fundamental do sistema, o que pode ser evidenciado na Figura A.2. Adicionalmente, a partir da comparação entre as correntes incremental e réplica incremental apresentadas, constata-se que, por ser resultante de uma queda de tensão em um circuito RL, o atraso observado nas correntes em relação às tensões dos sistemas indutivos, tais

**Figura A.2:** Correntes incremental e réplica incremental.

**Fonte:** Autoria própria.

como nos 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 tradicional, o que torna essa corrente imune à componente CC de decaimento exponencial característica dos sistemas indutivos (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Portanto, de forma genérica, a corrente réplica incremental pode ser representada a partir de:

$$\Delta i_Z = f_{IZ}(\Delta i, R_L, L_L) = D_0(R_L, L_L) \cdot \Delta i + D_1(R_L, L_L) \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i, \quad (\text{A.6})$$

em que as constantes  $D_0$  e  $D_1$  são obtidas conforme apresentado em (A.4).

## A.2 CONSIDERAÇÕES PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS: OS LOOPS DE FALTA

Os conceitos da corrente réplica relativos aos sistemas monofásicos devem ser expandidos para incluir apropriadamente as grandezas de *loop* de falta responsáveis por cobrir completamente todos os tipos de faltas característicos aos sistemas elétricos de potência, os quais são reconhecidamente trifásicos (Kasztenny *et al.*, 2016). Tradicionalmente, os desenvolvedores de relés de proteção criaram as correntes e tensões de *loop* de falta de tal forma que a impedância aparente medida pelo dispositivo de proteção, quando da utilização das grandezas referentes ao circuito puro de falta, fosse a impedância de sequência positiva da linha. Todavia, no caso das funções de proteção aplicadas no domínio do tempo, a relação entre as grandezas incrementais

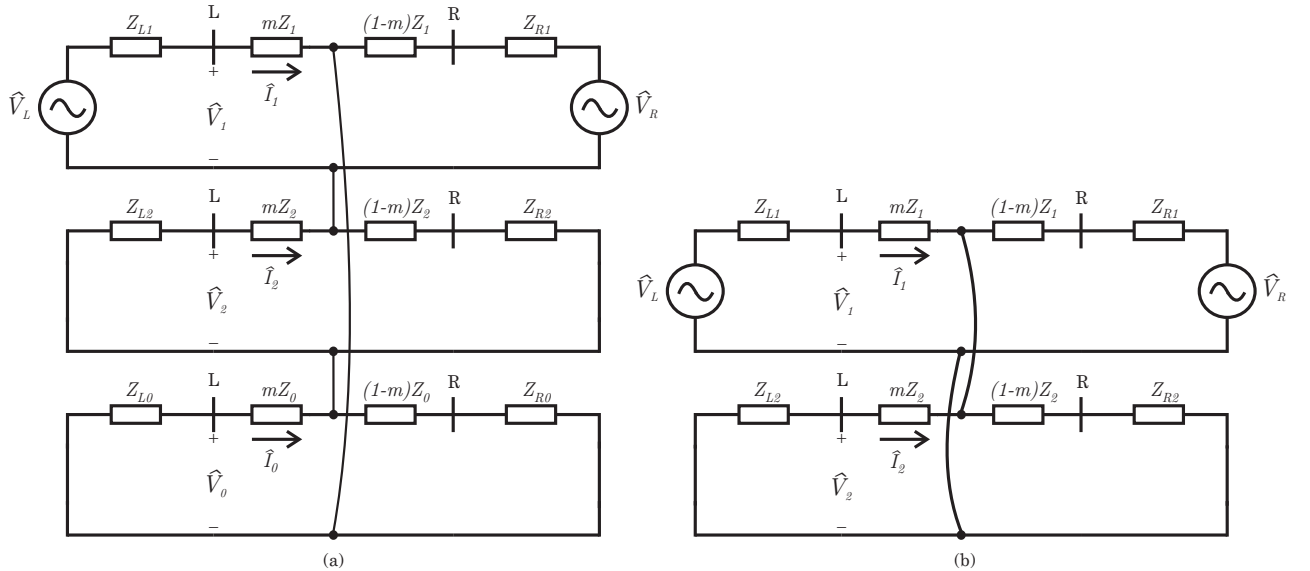
de tensão e corrente de *loop* são relacionadas a partir da magnitude da impedância de sequência positiva da LT (Kasztenny *et al.*, 2016).

Para a derivação das grandezas de *loop* de falta com interconexão à terra, considera-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 A.3. Portanto, obtém-se a seguinte relação:

$$\widehat{V}_1 + \widehat{V}_2 + \widehat{V}_0 = m \cdot (Z_1 \cdot \widehat{I}_1 + Z_2 \cdot \widehat{I}_2 + Z_0 \cdot \widehat{I}_0), \quad (\text{A.7})$$

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

**Figura A.3:** Componentes de sequência para: (a) Falta AT e (b) Falta BC.



**Fonte:** Autoria própria.

A partir de (A.7), podem ser obtidos os *loops* de corrente e tensão para uma falta AT em termos dos fasores medidos, admitindo-se sequência de fases positiva:

$$\widehat{V}_A = m \cdot (Z_1 \cdot \widehat{I}_1 + Z_1 \cdot \widehat{I}_2 + Z_1 \cdot \widehat{I}_0 - Z_1 \cdot \widehat{I}_0 + Z_0 \cdot \widehat{I}_0),$$

$$\widehat{V}_A = m \cdot (Z_1 \cdot \widehat{I}_A - (Z_1 - Z_0) \cdot \widehat{I}_0),$$

$$\widehat{V}_A = m \cdot Z_1 \cdot \left[ \widehat{I}_A - \left( 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \cdot \widehat{I}_0 \right] = m \cdot Z_1 \cdot \widehat{I}_{AT}, \quad (\text{A.8})$$

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 (A.8) e sabendo que  $Z_1 = |Z_1| \cdot 1\angle Z_1$ , a corrente réplica de *loop*  $\widehat{I}_{ZAT}$  é obtida:

$$\widehat{V}_A = m \cdot |Z_1| \cdot \left[ \widehat{I}_A \cdot 1\angle Z_1 - \left( 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \cdot \widehat{I}_0 \cdot 1\angle Z_1 \right] = m \cdot |Z_1| \cdot \widehat{I}_{ZAT} , \quad (\text{A.9})$$

sendo:

$$\widehat{I}_{ZAT} = \widehat{I}_A \cdot 1\angle Z_1 - \left( 1 - \frac{Z_0}{Z_1} \right) \cdot \widehat{I}_0 \cdot 1\angle Z_1 \quad (\text{A.10})$$

Ajustando  $\widehat{I}_{ZAT}$  em (A.10) em termos de módulo e fase das impedâncias de sequência positiva e zero da LT, obtém-se:

$$\widehat{I}_{ZAT} = \widehat{I}_A \cdot 1\angle Z_1 - \widehat{I}_0 \cdot \left( 1\angle Z_1 - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot 1\angle Z_0 \right) \quad (\text{A.11})$$

Como consequência, (A.11) pode ser reescrita no domínio do tempo conforme a seguir:

$$i_{ZAT} = f_{IZ}(i_A, R_1, L_1) - \left[ f_{IZ}(i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(i_0, R_0, L_0) \right] , \quad (\text{A.12})$$

onde  $R_1$ ,  $R_0$ ,  $L_1$ ,  $L_0$ ,  $Z_1$  e  $Z_0$  são as resistências, indutâncias e impedâncias de sequência positiva e zero da LT, respectivamente.

A partir do expresso em (A.12), pode-se obter a corrente réplica incremental de *loop* para uma falta AT em termos das componentes de sequência da rede elétrica em análise:

$$\Delta i_{ZAT} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_1, L_1) - \left[ f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0) \right] \quad (\text{A.13})$$

De forma similar às faltas monofásicas, podem ser obtidas as tensões e correntes de *loop* para as unidades de medição polifásicas. 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 A.3, obtém-se:

$$\begin{aligned} \widehat{V}_1 - m \cdot Z_1 \cdot \widehat{I}_1 &= \widehat{V}_2 - m \cdot Z_2 \cdot \widehat{I}_2 , \\ \widehat{V}_1 - \widehat{V}_2 &= m \cdot Z_1 \cdot (\widehat{I}_1 - \widehat{I}_2) \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Considerando-se uma sequência de fases positiva, (A.14) se reduz a:

$$\begin{aligned} \widehat{V}_B - \widehat{V}_C &= m \cdot Z_1 \cdot (\widehat{I}_B - \widehat{I}_C) , \\ \widehat{V}_{BC} &= m \cdot Z_1 \cdot \widehat{I}_{BC} , \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$



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:

$$\begin{aligned}\widehat{V}_{BC} &= m \cdot |Z_1| \cdot \widehat{I}_{BC} \cdot 1\angle Z_1, \\ \widehat{V}_{ZBC} &= m \cdot |Z_1| \cdot \widehat{I}_{ZBC},\end{aligned}\tag{A.16}$$

sendo:

$$\widehat{I}_{ZBC} = \widehat{I}_B \cdot 1\angle Z_1 - \widehat{I}_C \cdot 1\angle Z_1\tag{A.17}$$

Dessa forma, pode-se converter (A.17) para o domínio do tempo, resultando em:

$$i_{ZBC} = f_{IZ}(i_B, R_1, L_1) - f_{IZ}(i_C, R_1, L_1)\tag{A.18}$$

Em termos incrementais, (A.18) é dada por:

$$\Delta i_{ZBC} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_1, L_1) - f_{IZ}(\Delta i_C, R_1, L_1)\tag{A.19}$$

Assim sendo, considerando o exposto, procedimentos análogos podem ser realizados para obtenção das demais tensões e correntes de *loop* para as unidades monofásicas e polifásicas típicas de sistemas de proteção, as quais contemplam todos os tipos de falta em SEEs. Portanto, os sinais de *loop* a serem considerados são apresentados na Tabela A.1.

**Tabela A.1:** *Loops* de tensões e correntes incrementais no domínio do tempo.

Loop	Tensão, $\Delta v$	Corrente Réplica, $\Delta i_Z$
AT	$\Delta v_A$	$\Delta i_{AZ} - \Delta i_{0Z}$
BT	$\Delta v_B$	$\Delta i_{BZ} - \Delta i_{0Z}$
CT	$\Delta v_C$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{0Z}$
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	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$\Delta i_{CZ} - \Delta i_{AZ}$

**Fonte:** Adaptada de Schweitzer *et al.* (2014a).

Para a análise de cada um dos *loops* de falta apresentados na Tabela A.1, utilizam-se as seguintes funções:

$$\Delta i_0 = \frac{1}{3}(\Delta i_A + \Delta i_B + \Delta i_C)\tag{A.20}$$

$$\Delta i_{0Z} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0) \quad (\text{A.21})$$

$$\Delta i_{AZ} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_1, L_1) \quad (\text{A.22})$$

$$\Delta i_{BZ} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_1, L_1) \quad (\text{A.23})$$

$$\Delta i_{CZ} = f_{IZ}(\Delta i_C, R_1, L_1) \quad (\text{A.24})$$

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 a função apresentada em (A.6).

## APÊNDICE B

# PROCEDIMENTO DE AJUSTE DO RELÉ SEL-T400L

Toda e qualquer função de proteção deve ser parametrizada corretamente para que o seu funcionamento ocorra dentro do esperado. Neste contexto, diante da inovação promovida no estado da arte e no setor elétrico pelas funções de proteção disponíveis no T400L, faz-se necessário apresentar o procedimento padrão de ajuste de cada um dos parâmetros descritos na Tabela 5.3. Assim, apresenta-se a seguir a metodologia padrão descrita pela SEL para ajuste das funções e do esquema de teleproteção contidos no T400L. Inicia-se descrevendo os ajustes gerais e, em sequência, aqueles relacionados aos elementos de proteção.

### B.1 PARAMETRIZAÇÃO DOS AJUSTES GERAIS

Os ajustes gerais de proteção associados à operação do T400L (XC e EXTSC) são cruciais para operação segura e confiável das funções de proteção quando da presença de compensação série interna ou externa à linha monitorada. Na TD21, a tensão de restrição assume uma característica não mais variável com a tensão no ponto de alcance da proteção, mas sim uma característica *flat* obtida a partir da tensão nominal de pico do sistema mais uma margem de segurança para os cenários de compensação série externa à LT. Todavia, para as topologias em que o banco de capacitor se encontra na linha protegida, a partir do ajuste XC, a TD21 calcula a queda de tensão no banco e a contabiliza em sua grandeza de restrição (Kasztenny *et al.*, 2016). Entretanto, sabe-se que a qualquer instante pode ocorrer o *bypass* dos capacitores referentes à compensação série, portanto, a grandeza de restrição final derivada é aquela obtida a partir do valor máximo entre as tensões de restrição desconsiderando e considerando a presença do banco na linha monitorada (Kasztenny *et al.*, 2016).

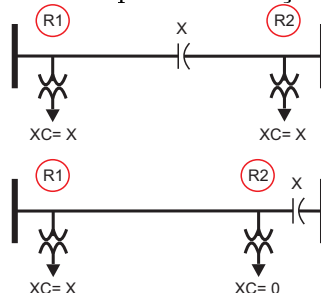
Por outro lado, na TW87, a função TD32 passa a supervisioná-la em ambos os terminais da LT (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019). Por fim, é notório que nas situações

em que ocorre o chaveamento do banco de capacitores interno à linha monitorada, grandezas incrementais e OV's de tensão e corrente se propagam em direção a ambos os terminais da LT, alcançando-os com polaridades contrárias. Desse modo, ambas as funções direcionais indicam a ocorrência de um distúrbio na linha. Visando distinguir eventos associados aos chaveamentos daqueles associados às faltas, o valor de *pickup* da supervisão por sobrecorrente do esquema de teleproteção *POTT* deve ser ajustado acima do máximo valor de corrente que flui pelo banco quando ocorre o *bypass* desse (Kasztenny *et al.*, 2016).

### B.1.1 Procedimento referente à XC

O ajuste referente à XC representa o valor da reatância capacitiva associada à compensação série interna à linha protegida. Conforme apresentado na Figura B.1, para um banco de capacitor com reatância nominal X, o parâmetro XC em cada um dos relés contidos nos terminais da LT (R1 e R2) assume o valor da reatância capacitiva do banco quando entre o TPC e o terminal oposto da LT localiza-se a compensação série da linha monitorada.

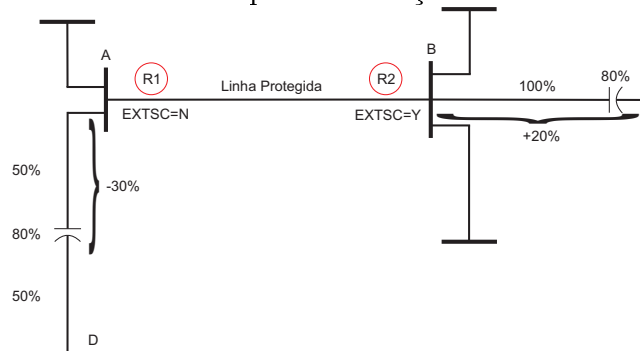
**Figura B.1:** Procedimento de parametrização referente ao ajuste XC.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

### B.1.2 Procedimento referente à EXTSC

O parâmetro referente à EXTSC indica as situações em que se observa a presença de compensação série externa à linha protegida. Neste contexto, conforme ilustrado na Figura B.2, deve ser configurado no T400L EXTSC=Y quando a soma entre a reatância capacitiva do banco de capacitor externo e a reatância indutiva do trecho de linha localizado entre o terminal remoto e a compensação série externa for negativa, conforme indicado para o relé R2. Por outro lado, caso a soma resulte em um valor positivo, não deve ser considerada a presença de

**Figura B.2:** Procedimento de parametrização referente ao ajuste EXTSC.

**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).

compensação série externa. Para tanto, no relé respectivo, deve ser configurado  $EXTSC=N$ , conforme indicado para o dispositivo R1. Ressalta-se que para as situações nas quais a função diferencial TW87 esteja habilitada, quando em pelo menos um dos relés se observar a presença de compensação série externa à linha protegida, em ambos os equipamentos aplicados aos terminais da LT deve ser ajustado  $EXTSC=Y$  (Kasztenny *et al.*, 2016).

## B.2 PARAMETRIZAÇÃO DA TD32

As impedâncias de ajustes TD32ZF e TD32ZR são utilizadas na obtenção dos limiares adaptativos de restrição associados à TD32, promovendo segurança e confiabilidade às suas atuações, e constituem os únicos ajustes relacionados ao presente elemento direcional. Neste contexto, tais ajustes são derivados a partir de diferentes considerações a respeito da homogeneidade dos sistemas elétricos de potência. Conforme destacado no Capítulo 4, nos SEEs homogêneos, ou seja, nos sistemas em que as impedâncias da linha e de seus circuitos adjacentes têm o mesmo ângulo de fase e possuem uma mesma relação de razão entre as impedâncias 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 dispositivo de proteção afere a magnitude da soma das impedâncias à sua frente. Todavia, para sistemas não-homogêneos, a impedância aparente medida está condicionada a erros.

Neste contexto, a partir de sistemas não-homogêneos reais, a fabricante do T400L apresenta estudos através dos quais erros esperados para impedância vista pela TD32 são obtidos (Kasztenny *et al.*, 2016). Como resultado, destaca-se a necessidade de criar limiares adapta-

tivos que contabilizem um fator de confiabilidade, evitando-se assim atuações indevidas em decorrência da não-homogeneidade dos sistemas. Portanto, com base nos desvios tipicamente observados nos SEEs não-homogêneos reais apresentados por Kasztenny *et al.* (2016), propõe-se que TD32ZF e TD32ZR sejam ajustados conforme apresentado a seguir:

$$\text{TD32ZF} = 0,3 \cdot \min(|Z_{S1}|), \quad (\text{B.1a})$$

$$\text{TD32ZR} = 0,3 \cdot (|Z_{LT1}|), \quad (\text{B.1b})$$

onde  $Z_{LT1}$  é a impedância de sequência positiva referente à linha monitorada e  $\min(|Z_{S1}|)$  é a menor impedância de sequência positiva observada no equivalente local da LT protegida, a qual deve ser obtida a partir de estudos de curto-circuito realizados no terminal associado.

Nas aplicações com compensação série interna, o valor da reatância capacitiva do banco, ou seja, o ajuste XC deve ser contabilizado no parâmetro TD32ZR, visto que o afeta. Sabendo que a função TD32, para os sistemas compensados, supervisiona tanto a TD21 quanto a TW87, a correta parametrização do elemento direcional é, portanto, crucial para segurança operacional do dispositivo de proteção avaliado neste trabalho.

### B.3 PARAMETRIZAÇÃO DA TD21

Como únicos ajustes relacionados à função de distância por subalcance aplicada no domínio do tempo e disponível no relé SEL T400L, têm-se TD21MP e TD21MG, os quais se referem às zonas de proteção para os *loops* de falta bifásicos e monofásicos, respectivamente. Embora também possua elemento de supervisão por sobrecorrente próprio, o ajuste de *pickup* relacionado à OC21 é obtido internamente ao dispositivo a partir dos parâmetros do sistema monitorado, tais como: impedância de sequência positiva da linha e tensão nominal. Dessa forma, o usuário do relé de proteção deve se preocupar em parametrizar corretamente apenas os alcances das zonas de proteção da função de distância.

Tipicamente, as zonas de proteção das funções de distância são escolhidas como uma parcela do comprimento em pu da linha monitorada. Neste contexto, nos algoritmos de distância tradicionais, faltas em primeira zona conduzem à operação instantânea da proteção. Portanto, é esperado que, para faltas desse tipo, funções de proteção de distância atuem o mais rápido possível e com a segurança necessária. Todavia, durante o processo de estimação da localização

do defeito, o qual é obtido, nas funções tradicionais, a partir de impedâncias resultantes dos sinais de corrente e tensão medidos, observam-se fontes de erros relacionadas aos transformadores para instrumentos, parâmetros elétricos de impedância da linha, efeito capacitivo, entre outras, tornando a localização imprecisa, principalmente para linhas mais longas (ZIEGLER, 2010). Por isso, tipicamente, os ajustes de alcance relacionados à primeira zona não são maiores que 80% do comprimento da LT, conforme reportado por Ziegler (2010).

Na TD21, somado aos erros supracitados, destacam-se também desvios referentes aos transitórios eletromagnéticos presentes nos sinais de tensão e corrente, os quais são inerentes à operação dos SEEs. Tipicamente, esses transitórios podem subalcançar ou sobrealcançar o elemento de distância em alguns eventos na linha quando esses ocorrem próximos ao final da zona de proteção da função. Por isso, com o intuito de promover segurança à TD21, os ajustes TD21MP e TD21MG também não abrangem todo o comprimento da LT, consistindo em zonas de proteção ainda menores do que aquelas tradicionalmente utilizadas nas funções de distância baseadas em fasores.

Kasztenny *et al.* (2016) destacam que a soma dos erros relacionados aos transformadores para instrumentos e às discrepâncias nos dados da linha produzem variações nos alcances medidos na ordem de 10% a 15% do comprimento em pu da LT. Além disso, Schweitzer *et al.* (2016) demonstram que os erros de sobrealcançe associados à TD21, os quais resultam dos transitórios presentes nos sinais elétricos monitorados, são menores do que 10% do comprimento em pu da linha. Assim, no T400L, considerando as fontes de erro citadas e sabendo que os dados de sequência zero da LT são, em geral, menos precisos que os de sequência positiva (Kasztenny *et al.*, 2016), recomenda-se o uso das seguintes zonas de proteção para os *loops* de falta bifásicos e monofásicos, respectivamente:

$$\text{TD21MP} = 0,75 \text{ pu}, \quad (\text{B.2a})$$

$$\text{TD21MG} = 0,70 \text{ pu}. \quad (\text{B.2b})$$

Mesmo nos sistemas em que se observa a presença de compensação série interna à linha protegida, os ajustes dos alcances da TD21 seguem o estabelecido em (B.2), visto que o sinal de restrição da função é modificado perante tais cenários (Kasztenny *et al.*, 2016).

## B.4 PARAMETRIZAÇÃO DA TW87

Conforme apresentado na Tabela 5.3, a TW87 apresenta basicamente dois conjuntos de ajustes, a saber: o tempo de propagação das ondas viajantes na linha e a supervisão por sobrecorrente. O tempo de trânsito (TWLPT) é de suma importância para a implementação da função diferencial, uma vez que possibilita a criação das janelas de buscas das OV's a serem contabilizadas no cálculo da grandeza de restrição associada. Por outro lado, a supervisão por sobrecorrente visa distinguir eventos de baixa energia daqueles com elevado conteúdo energético que possam ser classificados como um curto-circuito. A seguir, apresentam-se os procedimentos para obtenção de cada um dos conjuntos de ajustes supracitados.

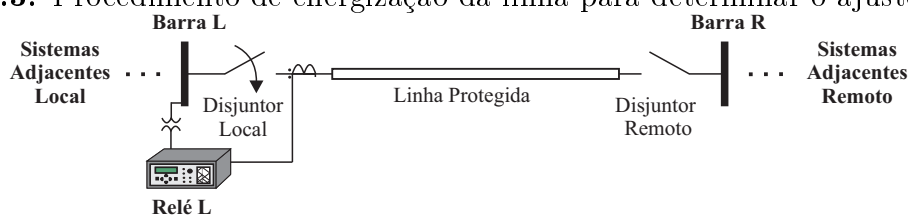
### B.4.1 Procedimento referente à TWLPT

O tempo de propagação de OV's na linha de transmissão monitorada (TWLPT — *Traveling Wave Line Propagation Time*) é um ajuste crucial para o funcionamento da TW87, visto que a grandeza de restrição dessa função é derivada a partir dessa variável. Embora variações de até  $10 \mu\text{s}$  sejam aceitáveis durante o ajuste de TWLPT, erros mais elevados comprometem a atuação do elemento diferencial, principalmente a segurança de suas indicações. Por isso, a fabricante do T400L recomenda a medição de TWLPT a partir de procedimentos de energização da linha durante a etapa de comissionamento do relé, ao invés do uso de parâmetros previamente conhecidos, garantindo assim a maior precisão possível no valor de ajuste resultante.

O procedimento a ser adotado consiste em manter o disjuntor do terminal remoto da linha monitorada em aberto e fechar o disjuntor local para dar início ao processo de energização da linha, conforme ilustrado na Figura B.3. Neste instante, lançam-se OV's de corrente e tensão que se propagam em direção ao terminal remoto da linha e aos sistemas adjacentes. Baseando-se na melhor resposta em frequência dos TCs (Saha *et al.*, 2010), a fabricante recomenda determinar o tempo de trânsito da linha a partir das medições de corrente obtidas. Para tanto, deve-se medir a diferença temporal entre a primeira onda incidente e a refletida do terminal remoto, o que equivale a  $2 \cdot \text{TWLPT}$  segundos.

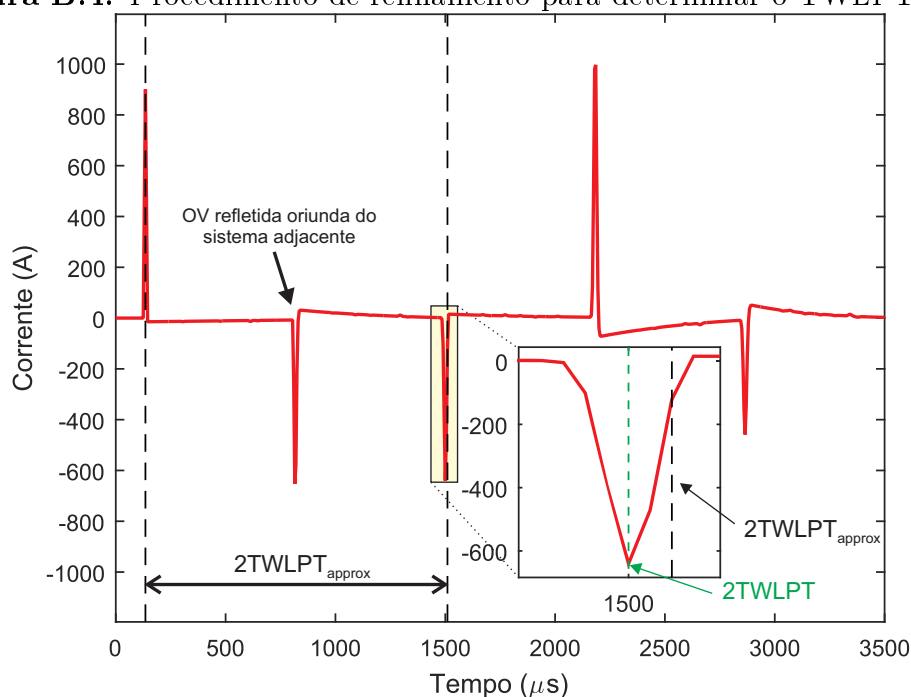
Em sistemas com linhas adjacentes, identificar apenas visualmente a onda de interesse é



**Figura B.3:** Procedimento de energização da linha para determinar o ajuste TWLPT.

**Fonte:** Autoria própria.

desafiador, visto que essa pode ser confundida com as reflexões resultantes dos sistemas circunvizinhos. Neste contexto, sabendo que as OV's se propagam em LT's aéreas com velocidade próxima à da luz (Schweitzer *et al.*, 2014b), pode-se obter inicialmente uma estimativa grosseira do tempo de trânsito (denominado de  $TWLPT_{\text{approx}}$ ) utilizando-se, para tanto, de informações previamente conhecidas a respeito do comprimento da linha. Portanto, o mecanismo de identificação da onda de interesse consiste em determinar a onda mais próxima ao instante de tempo que dista em  $2 \cdot TWLPT_{\text{approx}}$  da primeira onda incidente, com referência à fase cujo polo do disjuntor fechou por último. Neste momento, utilizando-se da resolução do T400L, pode-se refinar a estimativa inicial referente ao tempo de propagação e determinar o valor real de TWLPT, conforme ilustrado na Figura B.4. Por fim, com o intuito de aumentar a precisão do procedimento, a fabricante do relé recomenda utilizar as componentes alfa de Clarke com referência à fase em análise (Kasztenny *et al.*, 2016).

**Figura B.4:** Procedimento de refinamento para determinar o TWLPT real.

**Fonte:** Autoria própria.

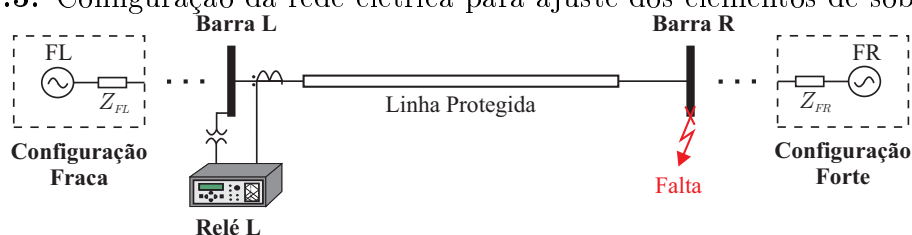
### B.4.2 Procedimento referente à supervisão por sobrecorrente

A função TW87 possui elementos de supervisão por sobrecorrente responsáveis por promover segurança às suas indicações quando da ocorrência de eventos na linha monitorada similares aos chaveamentos e às descargas atmosféricas nas quais não há a quebra de isolamento referente ao dielétrico circundante (Kasztenny *et al.*, 2016). Neste contexto, TP50P e TP50G definem os ajustes de sobrecorrente associados aos *loops* de falta bifásicos e monofásicos, respectivamente.

O procedimento de parametrização consiste em ajustar os parâmetros de sobrecorrente de forma a tornar a TW87 tão sensível quanto desejado, independentemente de haver ou não compensação série interna ou externa à linha monitorada. Tipicamente, ao efetuar o *bypass* de uma tensão capacitiva em um sistema predominantemente indutivo, lançam-se OV's que se propagam em direção a ambos os terminais da linha com polaridades contrárias, classificando-se, portanto, eventos desse tipo como externos à linha (Kasztenny *et al.*, 2016).

Tipicamente, durante o procedimento de ajuste dos elementos de sobrecorrente, recomenda-se o cálculo das correntes réplica de *loop* no domínio da frequência, utilizando-se os fasores incrementais para tanto. Essa recomendação visa reduzir os esforços computacionais associados ao procedimento, os quais são árduos quando realizados no domínio do tempo. Basicamente, com intuito de trazer a máxima sensibilidade aos ajustes TP50P e TP50G, no sistema em parametrização, deve-se considerar a seguinte topologia: o equivalente local assume uma configuração de fonte fraca, enquanto que o equivalente remoto assume uma configuração de fonte forte. Assumindo que o relé a ser ajustado é aquele referente ao terminal local da linha protegida, aplica-se um curto-circuito no terminal oposto, cuja resistência de falta ( $R_F$ ) deve estar em conformidade com a sensibilidade almejada (Kasztenny *et al.*, 2016), conforme apresentado na Figura B.5. Obtém-se, ao final do processo, a máxima sensibilidade possível para o esquema de supervisão por sobrecorrente.

**Figura B.5:** Configuração da rede elétrica para ajuste dos elementos de sobrecorrente.



Fonte: Autoria própria.

Quanto ao tipo de falta a ser aplicada durante o procedimento, esse varia conforme o ajuste considerado, a saber: para TP50P, faltas bifásicas e trifásicas devem ser contabilizadas (neste trabalho, faltas do tipo AB e ABC serão tomadas como referência); por outro lado, para TP50G, consideram-se apenas faltas monofásicas (neste trabalho, faltas do tipo AT serão tomadas como referência). Utilizando-se uma plataforma para análise de curtos-circuitos, a exemplo do ATP, aplicam-se os tipos de faltas supracitados estando o sistema na configuração apresentada na Figura B.5. Das correntes resultantes, para o relé em procedimento de ajuste, derivam-se as correntes incrementais de falta ( $\Delta I_A$ ,  $\Delta I_B$  e  $\Delta I_C$ ) a partir da diferença entre os fasores de falta e os de pré-falta. Assim, o ajuste TP50G é obtido conforme apresentado a seguir:

$$\Delta I_{AT} = \Delta I_A + \left( \frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right) \cdot \Delta I_0, \quad (\text{B.3a})$$

$$\text{TP50G} = 0,5 \cdot |\Delta I_{AT}|, \quad (\text{B.3b})$$

onde  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $\Delta I_0$  e  $\Delta I_{AT}$  são as impedâncias de sequência zero e positiva da linha e as correntes incrementais de sequência zero e do *loop* de falta AT, respectivamente.

De forma análoga, para TP50P, após a aplicação de faltas bifásica (tipo AB) e trifásica (tomando como referência de análise o *loop* AB) e a obtenção das correntes incrementais fasoriais associadas, derivam-se:

$$\Delta I_{AB1} = \Delta I_{A1} - \Delta I_{B1}, \quad (\text{B.4a})$$

$$\Delta I_{AB2} = \Delta I_{A2} - \Delta I_{B2}, \quad (\text{B.4b})$$

$$\text{TP50P} = 0,5 \cdot \min(|\Delta I_{AB1}|; |\Delta I_{AB2}|), \quad (\text{B.4c})$$

em que os subscritos 1 e 2 são referentes às faltas bifásica e trifásica, respectivamente.

## B.5 PARAMETRIZAÇÃO DO *POTT*

O esquema de teleproteção *POTT* embarcado no T400L é formado por dois elementos direcionais de potência cuja sensibilidade permite identificar distúrbios associados aos chaveamentos em compensadores série ou shunt internos à linha monitorada. Visando à emissão de *trip* somente quando da existência de curtos-circuitos na linha, o esquema dispõe de um rápido elemento de sobrecorrente direcional, para o qual uma correta parametrização de seus

valores de *pickup* para faltas monofásicas e bifásicas, TP67G e TP67P, respectivamente, é crucial. Neste contexto, apresenta-se a seguir o procedimento de parametrização dos elementos de sobrecorrente referentes ao *POTT* para diferentes topologias dos sistemas de transmissão.

### B.5.1 Parametrização para linhas sem compensação série interna

Para situações nas quais a linha monitorada não presencia o *bypass* de banco de capacitores série internos, a supervisão por sobrecorrente do *POTT* determina o nível de sensibilidade do esquema de teleproteção. Portanto, o procedimento de ajuste a ser considerado é análogo ao apresentado para a TW87 na Seção B.4.2, diferenciando-se apenas pela análise da corrente capacitiva da linha. Dessa forma, os ajustes TP67G e TP67P assumem os valores a seguir:

$$TP67G = \max(0, 5 \cdot |\Delta I_{AT}|; 1, 3 \cdot I_{1C}), \quad (B.5a)$$

$$TP67G = \max\left(0, 5 \cdot \min(|\Delta I_{AB1}|; |\Delta I_{AB2}|); 1, 3 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{1C}\right), \quad (B.5b)$$

onde  $I_{1C}$  é a corrente capacitiva de sequência positiva da linha e os demais parâmetros são definidos conforme apresentado na Seção B.4.2.

### B.5.2 Parametrização para linhas com compensação série interna

Para os sistemas de transmissão que possuam compensação série interna, os ajustes de sobrecorrente TP67G e TP67P devem ser parametrizados em um nível de corrente acima da máxima corrente incremental gerada pelo *bypass* do banco de capacitor associado à compensação. Sabe-se que a máxima intensidade de corrente observada é referente ao *bypass* simétrico quando os sistemas circunvizinhos à linha monitorada operam com fontes em configurações fortes (Kasztenny *et al.*, 2016). Portanto, assumindo o sistema monitorado na configuração mencionada, o ajuste de *TP67G* é obtido a partir da contabilização de um fator de segurança de 25% sobre a corrente incremental gerada pelo *bypass* do banco quando a tensão medida sobre o mesmo se iguala à tensão nominal do sistema. Assim, obtém-se:

$$TP67G = \frac{1,25}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{NOM}}{|Z_{1LOC} + Z_{1L} + Z_{1REM}|}, \quad (B.6)$$

onde  $V_{NOM}$ ,  $Z_{1LOC}$ ,  $Z_{1L}$  e  $Z_{1REM}$  são, respectivamente, a tensão nominal de linha do sistema e as impedâncias do equivalente local, da linha de transmissão monitorada e do equivalente

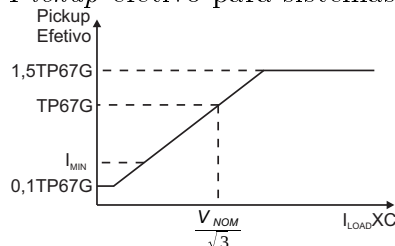
remoto.

Obtido o valor de *pickup* para os *loops* de falta monofásicos, pode-se determinar o TP67P conforme apresentado a seguir:

$$\text{TP67P} = \sqrt{3} \cdot \text{TP67G}. \quad (\text{B.7})$$

Nos sistemas de transmissão reais, observa-se continuamente a variação no equilíbrio entre carga e geração. Por consequência, a corrente de carregamento da linha varia constantemente, uma vez que essa é a responsável por interligar os centros de geração aos de consumo. Considerando um sistema de transmissão com compensação série interna, a tensão sobre o banco de capacitores acompanha essa variação, a qual é diretamente proporcional à corrente de carga ( $I_{LOAD}$ ). Assim sendo, com o intuito de maximizar a segurança do elemento de sobrecorrente bem como a sua sensibilidade perante tais cenários, o T400L calcula de forma contínua a tensão sobre o capacitor com base na corrente de carga medida, adaptando em sequência o valor de *pickup* efetivo, conforme apresentado na Figura B.6. Para tanto, a lógica de supervisão por sobrecorrente mantém o *pickup* efetivo entre os limites de 10 a 150% do valor de ajuste. Além disso, o valor de *pickup* final nunca será menor que um valor de corrente mínimo,  $I_{MIN}$ , o qual é diretamente proporcional à corrente capacitiva de sequência positiva da linha (SEL-T400L INSTRUCTION MANUAL, 2019).

**Figura B.6:** *Pickup* efetivo para sistemas compensados.



**Fonte:** Adaptada de SEL-T400L Instruction Manual (2019).