



**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA COMPUTACIONAL  
PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DO RELÉ SEL-T400L**

**LUMA DE ARAÚJO COSTA**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA COMPUTACIONAL  
PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DO RELÉ SEL-T400L**

**LUMA DE ARAÚJO COSTA**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

Prof. João Paulo Gomes Ribeiro, M.Sc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, setembro de 2020.

## FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, LUMA DE ARAÚJO

Desenvolvimento de Plataforma Computacional para Ajuste Automático do Relé SEL-T400L.  
[Distrito Federal] 2020.

xiii, xp., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenharia Eletricista, Engenharia Elétrica, 2020).

Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Proteção em linhas de transmissão

3. Domínio do tempo

I. ENE/FT/UnB

2. Relé T400L

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, L. A. (2020). Desenvolvimento de Plataforma Computacional para Ajuste Automático do Relé SEL-T400L, Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2020, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xp.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luma de Araújo Costa

TÍTULO: Desenvolvimento de Plataforma Computacional para Ajuste Automático do Relé SEL-T400L.

GRAU: Engenharia Eletricista                      ANO: 2020

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

---

Luma de Araújo Costa

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, aos meus pais, Mauro e Zélia, por me permitirem seguir os meus sonhos, mesmo significando me ter distante, sempre apoiando minhas decisões. Quero agradecer também ao meu melhor amigo e irmão, Luan, que sempre acreditou em mim e é minha fonte de inspiração diária. À minha tia Eunice, que considero como uma segunda mãe, por sempre estar presente me oferecendo ajuda.

A Flores, minha ouvinte e conselheira em todos os momentos, agradeço principalmente sua paciência para lidar comigo nos meus momentos mais difíceis.

Aos meus melhores amigos, Fernanda, Carol, Gshow, Goiano, João e Ruan, que por sorte tive o prazer de tê-los durante minha trajetória do curso e com certeza foram fundamentais para a conclusão desse grande ciclo da minha vida.

Às minhas melhores amigas, Adria, Alan, Neivinha e Iana, por mesmo estarem distantes, trouxeram conforto e conselhos fundamentais para as decisões mais adversas.

Ao meu orientador, Prof. Felipe, pelo grande entusiasmo e confiança durante todo o meu processo de orientação, sem dúvida sua didática e paciência foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos de LAPSE, Luiza, Tiago, Gustavo e Eduardo, que foram peças fundamentais na finalização desse trabalho, sou muita grata pela ajuda que recebi.

A todos os profissionais que durante esta trajetória tive a oportunidade de adquirir conhecimento.

À força maior que me guia, por sempre me lembrar de fazer o bem e proporcionar minha paz interior.

## RESUMO

Nos últimos anos, o avanço tecnológico promoveu a concepção de relés de proteção microprocessados robustos, os quais têm ganhado notoriedade devido aos seus tempos de operação ultra rápidos. Juntamente com a evolução desses dispositivos, programas vêm sendo desenvolvidos com o intuito de facilitar o processo de ajustes destes equipamentos. Todavia, sabe-se que apesar dos programas terem acompanhado essa evolução, muitas vezes estes ainda requerem cálculos externos de parâmetros pelo usuário, o que acarreta no aumento da sensibilidade a falhas por erros humanos na proteção. Nesse sentido, apresenta-se neste trabalho uma plataforma auxiliar para os cálculos dos ajustes das funções de proteção do relé microprocessado SEL-T400L, fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*. Para tanto, a metodologia apresentada faz uso de conceitos de grandezas incrementais, presentes nas funções direcional de potência (TD32) e de distância (TD21), e da teoria das ondas viajantes, existente nas funções direcional de potência (TW32) e diferencial de linhas (TW87). Por ser um relé cujos conceitos são ainda relativamente novos no setor elétrico, a plataforma proposta fornece ajustes de forma mais automatizada e didática, obtendo configurações confiáveis que garantem um desempenho satisfatório na atuação do SEL-T400L na proteção. Os resultados revelam simplicidade e versatilidade da plataforma desenvolvida, denominada LIGHTSET, a qual demonstra ser uma ferramenta prática durante o processo de ajuste do relé SEL-T400L.

**Palavras-chave:** SEL-T400L, grandezas incrementais, ondas viajantes, faltas em linhas de transmissão, proteção no domínio do tempo, transitórios.

## ABSTRACT

In recent years, technological advances have promoted the design of robust microprocessor protection relays, which have gained notoriety due to their ultra fast operating times. Along with the evolution of these devices, programs have been developed in order to facilitate the process of adjusting these equipment. However, it is known that although programs have followed this evolution, they often still require external parameter calculations from the user, which leads to an increased sensitivity to failures due to human errors in protection. Thus, this work presents an auxiliary platform for the calculation of the adjustment, manufactured by *Schweitzer Engineering Laboratories*. For this purpose, the presented methodology makes use of concepts of incremental quantities, present in the directional element (TD32) and distance element (TD21), and the traveling wave theory, existing in the directional element (TW32) and differential element (TW87). As it is a relay whose concepts are still relatively new in the electrical sector, this platform is intended to provide adjustments in a more automated and didactic way, obtaining reliable configurations that guarantee a satisfactory performance of the SEL-T400L in protection. The results reveal the simplicity and versatility of the developed platform, called LIGHTSET, which proves to be a practical tool throughout the adjustment process of the SEL-T400L relay.

**Keywords:** SEL-T400L, incremental quantities, traveling waves, fault on transmission lines, time domain protection, transients.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iv
<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Lista de Símbolos</b>	ix
<b>Glossário</b>	xii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Contextualização do Tema . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	3
1.3 Organização do Texto . . . . .	3
<b>Capítulo 2 – Histórico</b>	5
<b>Capítulo 3 – Fundamentação Teórica</b>	9
3.1 Conceitos Básicos . . . . .	9
3.1.1 Grandezas Incrementais . . . . .	10
3.1.1.1 Corrente Réplica Incremental . . . . .	11
3.1.1.2 <i>Loops</i> de falta . . . . .	13
3.1.2 Princípios das Ondas Viajantes . . . . .	14
3.1.2.1 Modelos de LTs . . . . .	15
3.1.2.2 Propagação de OV's em Sistemas de Transmissão . . . . .	15
3.2 Funções Auxiliares do Relé SEL-T400L . . . . .	17
3.2.1 <i>Arming Logic</i> . . . . .	17
3.2.2 <i>Starting Logic</i> . . . . .	17
3.2.3 Supervisão por Sobrecorrente . . . . .	18
3.3 Funções de Proteção do Relé SEL-T400L . . . . .	18
3.3.1 <i>Time Domain</i> - TD32 . . . . .	19

3.3.1.1	Fundamentação da TD32 . . . . .	19
3.3.1.2	Implementação e Configuração da TD32 no SEL-T400L . . . . .	21
3.3.2	<i>Time Domain</i> - TD21 . . . . .	22
3.3.2.1	Fundamentação da TD21 . . . . .	22
3.3.2.2	Implementação e Configuração da TD21 no SEL-T400L . . . . .	25
3.3.3	<i>Traveling Wave</i> - TW32 . . . . .	26
3.3.3.1	Fundamentação da TW32 . . . . .	26
3.3.3.2	Implementação e Configuração da TW32 no SEL-T400L . . . . .	27
3.3.4	<i>Traveling Wave</i> - TW87 . . . . .	29
3.3.4.1	Fundamentação da TW87 . . . . .	29
3.3.4.2	Implementação e Configuração da TW87 no SEL-T400L . . . . .	31
3.4	Resumo dos Ajustes do Relé SEL-T400L . . . . .	32
 <b>Capítulo 4 – O LIGHTSET</b>		 34
4.1	Visão Geral . . . . .	34
4.2	Aquisição de Dados . . . . .	35
4.2.1	Configurações Iniciais . . . . .	36
4.2.2	Ajustes da Proteção . . . . .	42
4.2.2.1	TP50P e TP50G . . . . .	43
4.2.2.2	TD32ZF e TD32ZR . . . . .	45
4.2.2.3	TD21MP e TD21MG . . . . .	46
4.2.2.4	TP67P e TP67G . . . . .	47
4.3	Processamento dos Dados . . . . .	49
4.3.1	Funções de Proteção . . . . .	50
4.3.1.1	TW87 . . . . .	50
4.3.1.2	TD32 . . . . .	51
4.3.1.3	TD21 . . . . .	52
4.3.1.4	POTT . . . . .	53
4.3.2	Comunicação com o Relé . . . . .	54
 <b>Capítulo 5 – Avaliação do LIGHTSET</b>		 56
5.1	Parametrização do SEL-T400L em sistemas de potência . . . . .	56
5.1.1	Sistema Simples . . . . .	56
5.1.1.1	Método Manual . . . . .	57
5.1.1.2	Método LIGHTSET . . . . .	59
5.1.2	Sistema Complexo . . . . .	62
5.1.2.1	Método LIGHTSET . . . . .	63

---

5.1.3	Síntese dos Ajustes . . . . .	66
5.2	Análise de Resultados . . . . .	67
5.2.1	Sistema Simples . . . . .	68
5.2.1.1	Análise pontual dos casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os ajustes TP50G e TP50P . . . . .	69
5.2.1.2	Análise pontual dos casos 7, 8 e 9 para os ajustes TD32ZF e TD32ZR . . . . .	70
5.2.1.3	Análise pontual dos casos 10, 11, 12 e 13 para os ajustes TD21MP e TD21MG . . . . .	70
5.2.1.4	Análise pontual dos casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os ajustes TP67G e TP67P . . . . .	71
5.2.2	Sistema Complexo . . . . .	72
5.2.2.1	Análise pontual dos casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os ajustes TP50G e TP50P . . . . .	73
5.2.2.2	Análise pontual dos casos 7 e 8 para os ajustes TD32ZF e TD32ZR . . . . .	74
5.2.2.3	Análise pontual dos casos 9, 10, 11, 12, 13 e 14 para os ajustes TD21MP e TD21MG . . . . .	74
5.2.2.4	Análise pontual dos casos para os ajustes TP67P e TP67G . . . . .	75
<b>Capítulo 6 – Conclusão e Propostas Futuras</b>		<b>76</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>		<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Sinais de corrente de uma rede elétrica no período de pré-falta e pós-falta. . . .	10
3.2	Sinais de corrente para uma falta: (a) Corrente de carregamento; (b) Corrente monitorada; (c) Corrente incremental obtida para o valor de $p=1$ (RIBEIRO, 2019). . . . .	11
3.3	Circuito puro de falta e as relações de tensões e correntes incrementais para faltas diretas (a) e faltas reversas (b). . . . .	12
3.4	Relações de tensões e correntes incrementais em faltas diretas (a) e em faltas reversas (b). . . . .	13
3.5	LT modelada a parâmetros distribuídos (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2014). . . . .	16
3.6	OVs de tensão lançadas na LT (RIBEIRO, 2019). . . . .	17
3.7	Diagrama lógico simplificado da TD32 para o <i>loop</i> AT (SEL, 2019). . . . .	21
3.8	Perfil de tensão estimado pelo relé para um sistema elétrico com falta. . . . .	23
3.9	Relações entre as tensões de operação e restrição para faltas internas (a) e faltas reversas (b). . . . .	24
3.10	Diagrama lógico simplificado da TD21 para o <i>loop</i> de falta AT (SEL, 2019). . . .	25
3.11	Polaridade das OVs para uma falta interna (a) e para uma falta externa (b) (RIBEIRO, 2017). . . . .	27
3.12	Diagrama lógico simplificado da TW32 (RIBEIRO, 2019). . . . .	28
3.13	Princípio de operação da TW87 para: (a) faltas internas e (b) faltas externas. .	30
3.14	Diagrama lógico simplificado da TW87 (RIBEIRO, 2019). . . . .	31
4.1	Interface gráfica inicial do LIGHTSET. . . . .	35

4.2	Fluxograma do LIGHTSET. . . . .	35
4.3	Interface gráfica da etapa <i>Configurações Iniciais</i> . . . . .	36
4.4	Fluxograma dos procedimentos da <i>AC Inputs</i> . . . . .	38
4.5	Relações dos terminais da LT (SEL, 2019). . . . .	39
4.6	Fluxograma dos procedimentos da <i>Line Configuration</i> . . . . .	39
4.7	Procedimento de parametrização da configuração <i>XC</i> (SEL, 2019). . . . .	41
4.8	Procedimento de parametrização da configuração <i>EXTSC</i> (SEL, 2019). . . . .	42
4.9	Interface gráfica da etapa <i>Ajustes da Proteção</i> . . . . .	42
4.10	Fluxograma dos procedimentos da <i>TW87</i> . . . . .	43
4.11	Configuração do sistema elétrico para os ajustes de sobrecorrente <i>TP50P</i> e <i>TP50G</i> . . . . .	45
4.12	Fluxograma dos procedimentos da <i>TD32</i> . . . . .	45
4.13	Configuração dos limiares de impedância <i>TD32ZF</i> e <i>TD32ZR</i> . . . . .	46
4.14	Interface gráfica da etapa <i>TD32</i> . . . . .	47
4.15	Interface gráfica da etapa <i>TD21/POTT</i> . . . . .	48
4.16	Fluxograma dos procedimentos do esquema POTT. . . . .	49
4.17	Interface gráfica da comunicação com o relé. . . . .	54
4.18	Interface gráfica da tabela de configurações do relé. . . . .	55
4.19	Interface gráfica das ferramentas auxiliares. . . . .	55
5.1	Configuração do Sistema Simples no <i>ATP</i> . . . . .	56
5.2	Configurações Iniciais para o Sistema Simples. . . . .	60
5.3	Ajustes da Proteção da <i>TW87</i> para o Sistema Simples. . . . .	61
5.4	Ajustes da Proteção da <i>TD32</i> para o Sistema Simples. . . . .	61
5.5	Ajustes da Proteção da <i>TD21</i> e <i>POTT</i> para o Sistema Simples. . . . .	62
5.6	Configuração do Sistema Complexo no <i>ATP</i> . . . . .	62
5.7	Configurações Iniciais do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto. . . . .	64

---

5.8	Ajustes da Proteção da TW87 do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto. . . . .	65
5.9	Ajustes da Proteção da TD32 do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto. . . . .	65
5.10	Ajustes da Proteção da TD21 e POTT do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto. . . . .	66

## LISTA DE TABELAS

3.1	<i>Loop</i> de tensões e correntes incrementais no domínio do tempo. . . . .	14
3.2	Ajustes da função de proteção TD32. . . . .	22
3.3	Ajustes da função de proteção TD21. . . . .	26
3.4	Ajustes da função de proteção TW87. . . . .	32
3.5	Ajustes do Relé SEL-T400L. . . . .	33
4.1	Configurações gerais ( <i>General</i> ). . . . .	37
4.2	Entradas de corrente ( <i>AC Inputs</i> ). . . . .	37
4.3	Configurações da LT ( <i>Line Configuration</i> ). . . . .	40
4.4	Configurações do esquema POTT. . . . .	47
4.5	Ferramentas auxiliares. . . . .	55
5.1	Dados do Sistema Simples. . . . .	57
5.2	Valores dos sinais de correntes de pré-falta, falta e incremental para os ajustes TP50P e TP50G. . . . .	58
5.3	Valores dos sinais de correntes e tensões de pré-falta, falta e incremental para os ajustes TD32ZF e TD32ZR. . . . .	59
5.4	Variáveis finais e parciais dos ajustes. . . . .	59
5.5	Dados do Sistema Complexo. . . . .	63
5.6	Síntese dos Ajustes. . . . .	67
5.7	Tempo de atuação do relé local para o Sistema Simples. . . . .	68
5.8	Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TW87 para o Sistema Simples. . . . .	69

---

5.9	Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD32 para o Sistema Simples. . .	70
5.10	Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD21 para o Sistema Simples. . .	71
5.11	Tempo de atuação do relé local dos ajustes do esquema POTT para o Sistema Simples. . . . .	71
5.12	Tempo de atuação do relé local para o Sistema Complexo. . . . .	72
5.13	Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TW87 para o Sistema Complexo.	73
5.14	Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD32 para o Sistema Complexo.	74
5.15	Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD21 para o Sistema Complexo.	74
5.16	Tempo de atuação do relé local dos ajustes do esquema POTT para o Sistema Complexo. . . . .	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta s(t)$	Grandeza incremental instantânea para a variável $s$ .
$\Delta t$	Período de amostragem.
$p$	Número de ciclos que determina a duração da grandeza incremental.
$T$	Período fundamental da grandeza incremental.
$i_Z(t)$	Corrente réplica.
$Z_{LT}$	Impedância da linha de transmissão.
$C$	Capacitância da linha.
$Z_s$	Impedância de surto.
$v(t)$	Tensão instantânea por fase.
$i(t)$	Corrente instantânea por fase.
$\Delta v(t)$	Tensão incremental de <i>loop</i> .
$\Delta i_Z(t)$	Corrente incremental de <i>loop</i> .
$T_{OP}(t)$	Torque de operação da TD32.
$T_{FWD}(t)$	Torque de restrição da TD32 para faltas diretas.
$T_{REV}(t)$	Torque de restrição da TD32 para faltas reversas.
$TD32ZF$	Ajuste de impedância para faltas diretas.
$TD32ZR$	Ajuste de impedância para faltas reversas.
$START$	<i>Word-bit</i> da função <i>Starting Logic</i> .
$AGFLT$	<i>Word-bit</i> da função <i>Starting Logic</i> para o <i>loop</i> de falta AT.

---

$ABFLT$	<i>Word-bit</i> da função <i>Starting Logic</i> para o <i>loop</i> de falta AB.
$CAFLT$	<i>Word-bit</i> da função <i>Starting Logic</i> para o <i>loop</i> de falta CA.
$AGARM$	<i>Word-bit</i> da função <i>Arming Logic</i> para o <i>loop</i> de falta AT.
$ABARM$	<i>Word-bit</i> da função <i>Arming Logic</i> para o <i>loop</i> de falta AB.
$CAARM$	<i>Word-bit</i> da função <i>Arming Logic</i> para o <i>loop</i> de falta CA.
$V_{21OP}(t)$	Tensão de operação da TD21.
$V_{21R}(t)$	Tensão de restrição da TD21.
$TD21MG$	Alcance para os loops de falta monofásicos.
$TD21MP$	Alcance para os loops de falta bifásicos.
$OC21AG$	<i>Word-bit</i> da <i>Supervisão por sobrecorrente</i> para o <i>loop</i> de falta AT.
$TD21AG$	<i>Word-bit</i> da função TD21 para o <i>loop</i> de falta AT.
$T_{32OP}(t)$	Torque de operação da TW32.
$T_{32OP,min}(t)$	Ajuste do limiar mínimo do torque de operação.
$v_{TW}(t)$	OVs de tensão.
$i_{TW}(t)$	OVs de corrente.
$E_A, E_B, E_C$	Energia de operação para as fases A, B e C.
$E_{RA}, E_{RB}, E_{RC}$	Energia de restrição para as fases A, B e C.
$ENOP$	Energia de operação da TW32.
$ENRT$	Energia de restrição da TW32.
$TW32F$	<i>Word-bit</i> da função TW32 para faltas diretas.
$TW32R$	<i>Word-bit</i> da função TW32 para faltas reversas.
$TWLPT$	Ajuste do tempo de propagação da linha.
$OC87$	<i>Word-bit</i> da <i>Supervisão por sobrecorrente</i> da TW87.
$TW87$	<i>Word-bit</i> da TW87 para faltas.
$XC$	Ajuste da reatância total dos capacitores em série na linha.

---

$EXTSC$	Ajuste da presença ou ausência de capacitores externos próximos a linha.
$OCTP$	<i>Word-bit</i> da <i>Supervisão por sobrecorrente</i> do esquema <i>POTT</i> .
$\Delta I_A$	Fasor de corrente de falta incremental referente à fase A.
$\Delta I_0$	Fasor de corrente de sequência zero incremental.
$\Delta I_{AT}$	Fasor de corrente incremental para o <i>loop</i> de falta AT.
$\Delta I_{AB,2\phi}$	Fasor de corrente incremental para o <i>loop</i> de falta AB para defeito bifásico.
$\Delta I_{AB,3\phi}$	Fasor de corrente incremental para o <i>loop</i> de falta AB para defeito trifásico.
$\Delta I_{1C}$	Corrente capacitiva de sequência positiva da linha.
$\Delta V_A$	Fasor da tensão na fase A.
$Z_{L1}$	Impedância de sequência positiva do equivalente local.
$Z_{LT1}$	Impedância de sequência positiva da linha.
$Z_{R1}$	Impedância de sequência positiva do equivalente remoto.

## GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
POTT	<i>Permissive Overreaching Transfer Trip</i>
LT	Linha de Transmissão
SEE	Sistema de Energia Elétrica
OV	Onda Viajante
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
TD	<i>Time-Domain</i>
TD32	<i>Time-Domain 32</i>
TD21	<i>Time-Domain 21</i>
TW	<i>Traveling-Wave</i>
TW32	<i>Traveling-Wave 32</i>
TW87	<i>Traveling-Wave 87</i>
T400L	Relé microprocessado baseado no domínio do tempo
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
UnB	Universidade de Brasília

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O setor elétrico brasileiro, assim como em muitas partes do mundo, tem sofrido grandes transformações nos últimos anos. A necessidade premente de garantir a universalização do acesso torna a energia elétrica um produto indispensável, não só em intensidade como também em qualidade. Com base nos dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), de 2010 a 2018 o aumento da oferta de energia elétrica por habitante foi de 8% (EPE, 2020). Todas essas mudanças trouxeram novos desafios aos profissionais que atuam no setor elétrico.

O sistema de transmissão, que tem por função precípua o transporte da energia elétrica dos centros de produção aos de consumo, deve operar interligado. Tal interligação é exigida por várias razões, dentre elas destacando-se a confiabilidade e a possibilidade de intercâmbio entre as áreas (KAGAN *et al.*, 2010). No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é responsável por esta interconexão dos sistemas elétricos. Com base nos dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão responsável pela operação do SIN, em 2018 o Brasil já contava com mais de 133.000 km de extensão de linhas de transmissão (LTs) (ONS, 2020), com um aumento percentual comparado a 2016 de aproximadamente 7,71%.

Em Sistemas de Energia Elétrica (SEE), entre 80% e 90% dos curtos-circuitos estão relacionados às LTs (TLEIS, 2008). Cada milissegundo economizado no tempo de eliminação de falhas, quando comprovado que a proteção atuará em todas as situações, pode significar mais energia transferida. Em um artigo da *Bonneville Power Administration*, comprovou-se que a redução de um ciclo no tempo de eliminação de uma falta em uma linha específica, ocasionou um aumento de energia transferida de 250 MW, cerca de 15 MW/ms (EASTVEDT, 1996). Além disso, com a redução desse tempo de atuação da proteção, há um menor desgaste dos equipamentos durante faltas e melhorias na qualidade da energia em redes circunvizinhas.

Sabendo da considerável participação que o sistema de transmissão possui no sistema elétrico, pesquisadores têm buscado continuamente aprimorar as proteções existentes com base na velocidade, sensibilidade, confiabilidade, segurança e seletividade. Diante disso, buscam-se mais proteções que promovam redução nos tempos na eliminação de faltas e, conseqüentemente, aumento da estabilidade do sistema. Devido às limitações em termos de tempo de operação dos relés tradicionais, baseados em fasores, os quais possuem um atraso associado à janela de observação de amostras, de meio a um e meio ciclos em regime permanente, necessárias para realizar a correta estimação fasorial dos sinais monitorados, encontra-se em relés no domínio do tempo uma solução promissora para mitigar tais limitações (SCHWEITZER *et al.*, 2015a).

A aplicação de funções de proteção no domínio do tempo, devido à redução do tempo de operação da proteção, proporciona o aumento das margens de estabilidade do SEE e o aumento de vida útil dos equipamentos. Baseando-se nesses benefícios e tomando vantagem dos avanços tecnológicos, que permitiram aos relés funcionarem com taxas de amostragem na ordem de MHz, viabilizando a aplicação de algoritmos baseados em grandezas no domínio do tempo (SAHA, 2010), foram desenvolvidos relés numéricos no domínio do tempo com o objetivo de reduzir atrasos nos tempos de detecção e atuação em faltas, a exemplo o dispositivo SEL-T400L (SCHWEITZER *et al.*, 2015b). As funções de proteção contidas neste dispositivo são aplicadas no domínio do tempo e se baseiam nos princípios das grandezas incrementais, resumindo-se nos elementos de proteção de distância (TD21) e proteção direcional de potência (TD32); e na teoria de ondas viajantes, consistindo-se nos elementos de proteção de potência (TW32) e proteção diferencial (TW87).

Por outro lado, sabe-se que por ser um relé novo no mercado, que usa princípios até certo ponto pouco conhecidos e ainda pouco difundidos no setor elétrico, verificam-se dificuldades adicionais no procedimento de ajuste das funções de proteção embarcadas, exigindo mais conhecimento técnico em sua operação e parametrização. Dessa maneira, o uso de configurações confiáveis tem sido crucial para garantir um desempenho satisfatório das funções de proteção e localização de falta presentes neste relé. Todavia, observa-se que devido ao aumento de complexidade dos esquemas de proteção utilizados, tal como em qualquer esquema de proteção, erros humanos nas configurações podem acarretar em operações do relé diferentes do esperado. Por exemplo, no Brasil mais de 56% das más operações de proteção estão relacionadas aos erros

humanos durante os cálculos de configurações ou durante o carregamento destes ajustes em relés de proteção (LOPES *et al.*, 2020).

Com base no exposto, tem-se verificado uma crescente busca do setor elétrico por ferramentas computacionais capazes de auxiliar a operação e parametrização destes relés no domínio do tempo, reduzindo operações incorretas e acidentais na proteção. Sabe-se que muitos erros de atuação dos relés ocorrem por má parametrização dos ajustes, além do que, por se tratar de um dispositivo novo, ainda são poucas as soluções existentes para o auxílio do seu uso, fatos estes motivadores deste trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Sabendo que a parametrização do relé SEL-T400L no domínio do tempo requer conhecimentos prévios sobre grandezas incrementais, ondas viajantes e cálculos adicionais, apresenta-se neste trabalho o LIGHTSET, uma plataforma cuja finalidade é propor um algoritmo para auxiliar nos cálculos e no entendimento dos ajustes das funções de proteção do SEL-T400L. Esta plataforma computacional possui interface didática e intuitiva.

Para avaliar o desempenho do LIGHTSET, diferentes cenários de faltas em LTs foram testados no relé, considerando dois sistemas com diferentes topologias e parâmetros. A partir dos resultados obtidos, constata-se que o LIGHTSET é prático, eficiente e calcula ajustes de forma rápida e automatizada.

Como objetivos específicos do trabalho, destacam-se:

- Fazer uma revisão bibliográfica dos tipos de relés e dos seus processos de ajustes;
- Fundamentar as funções de proteção utilizadas no relé SEL-T400L;
- Desenvolver o código e a interface gráfica da plataforma computacional LIGHTSET;
- Simular faltas e avaliar a atuação do relé utilizando ajustes calculados pelo LIGHTSET.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira:

- No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos relés e de suas parametrizações;

- No capítulo 3, fundamentam-se os princípios de funcionamento e operação das funções de proteção do SEL-T400L;
- No capítulo 4, descreve-se o funcionamento da plataforma desenvolvida neste trabalho, o LIGHTSET;
- No capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos das análises da atuação do relé ajustado pelo LIGHTSET para diferentes cenários de faltas e sistemas;
- Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e propostas para futuros trabalhos que possam dar continuidade a este estudo.

## CAPÍTULO 2

# HISTÓRICO

Neste capítulo, com o objetivo de facilitar o entendimento da plataforma computacional do relé microprocessado SEL-T400L que será apresentado no decorrer deste trabalho, apresenta-se um histórico no que diz respeito aos relés presentes nos sistemas elétricos. A apresentação dos trabalhos segue uma sequência histórica cujo objetivo é destacar a evolução ao longo dos anos dos relés e seu processo de parametrização.

Os relés têm evoluído progressivamente desde que surgiu o primeiro dispositivo de proteção eletromecânico em 1901. Este relé eletromecânico consistia em um relé de proteção de sobrecorrente do tipo indução. Por volta de 1908 foi desenvolvido o princípio da proteção diferencial de corrente, seguindo-se, em 1910, o desenvolvimento das proteções direcionais. Somente por volta de 1930 foi desenvolvida a proteção de distância (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os relés eletromecânicos são equipamentos dotados de bobinas, disco de indução, molas e contatos fixos e móveis que garantem uma grande robustez. Seus ajustes são feitos através de switches e tapes no próprio relé, por meio de diais instalados sob a sua tampa de vidro, facilmente retirada. As dimensões externas dos relés eletromecânicos para cada função são padronizadas entre os fabricantes, de forma que a troca de função do relé pode ser realizado simplesmente substituindo os painéis, sem nenhuma adaptação na instalação (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Por outro lado, entre suas desvantagens, estes dispositivos apresentam apenas uma única função de proteção por relé, sendo necessários muitos relés para criar um esquema de proteção confiável. Além disso, estes dispositivos não possuem memória para registrar as ocorrências e nenhuma possibilidade de integração via rede, assim como possuem limitações de correntes de ranges para ajuste que permitam uma maior seletividade do sistema (OLIVEIRA, 2004). Todavia, apesar da tendência de se tornarem obsoletos, esses relés ainda são utilizados na proteção de sistemas elétricos, sobretudo em sistemas de distribuição. Por possuírem tempo de vida útil duradouro, geralmente sua troca só acontece quando o sistema passa por alguma

ampliação ou reforma com o intuito de melhorar o seu desempenho operacional.

Os dispositivos eletromecânicos evoluíram ao longo dos anos, permitindo que os esquemas de proteção alcançassem cada vez mais um elevado grau tanto de sofisticação quanto de confiabilidade. Sobretudo, na década de 1930 surgiram os primeiros relés de proteção com tecnologia à base de componentes eletrônicos, utilizando semicondutores. Todavia, estes relés eletrônicos ou estáticos não alcançaram aceitação imediata no mercado, devido à forte presença dos relés eletromecânicos, que já nessa época eram fabricados com tecnologia de alta qualidade, praticidade e competitividade. Além do mais, antes da introdução dos relés eletrônicos nos países tropicais, em função das elevadas temperaturas ambiente, esses relés não encontraram uma aceitação generalizada por parte dos profissionais de proteção e essa tecnologia não chegou a ameaçar o mercado dos relés eletromecânicos (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os relés eletrônicos ou estáticos analógicos apresentam dimensões reduzidas com relação aos relés eletromecânicos, o que permite o uso de painéis de comando e controle com menores dimensões. São constituídos de circuitos integrados dedicados a cada função desempenhada. Além disso, apresentam dispositivos reconfiguráveis, ocasionando uma maior flexibilidade devido à troca de cartões eletrônicos e maior sensibilidade em operações com níveis de tensão e correntes muito reduzidos; seus ajustes são realizados através de diais fixados na parte frontal do relé, cada dial ajusta uma determinada função de proteção. Estes dispositivos apresentam uma precisão elevada e simplicidade nos ajustes, além de elevada velocidade de operação (RAO, 1989). Entretanto, os relés eletrônicos não trouxeram grande inovação em relação aos sistemas de proteção. Na prática, as funções de proteção desenvolvidas para os relés eletromecânicos, através de peças mecânicas e tecnologia de indução, foram reproduzidas nos relés eletrônicos, só que agora utilizando circuitos impressos. Ademais, os relés estáticos, assim como os relés eletromecânicos, não trouxeram integração via rede (KINDERMANN, 1997).

Na década de 1980, devido ao desenvolvimento acelerado da microeletrônica, surgiram as primeiras unidades de proteção utilizando a tecnologia digital. Entretanto, com o histórico do fracasso tecnológico das proteções eletrônicas, com as sucessivas falhas desses dispositivos, o mercado nacional não absorveu prontamente esta tecnologia. Algumas concessionárias, receosas com o uso dos relés digitais, chegaram a utilizá-los como proteção de retaguarda juntamente com os relés eletromecânicos. Evidencia-se que as principais falhas destes equipamentos mais

---

tecnológicos eram devido a sua alta sensibilidade às temperaturas elevadas, ocasionando falhas graves de funcionamento (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os relés digitais atualmente dominam o mercado. Com a automação cada vez mais em evolução, os relés digitais passaram a ser elementos obrigatórios nos esquemas de proteção. São constituídos de circuitos eletrônicos providos de chips de alta velocidade de processamento. Funcionam através de programas dedicados que processam as informações que chegam pelos transformadores. Por meio de contatos externos são efetuados os comandos decididos pelo processo de avaliação microprocessado do relé. Seus ajustes são efetuados ou no frontal do relé por uma tecla de membrana por meio de instruções específicas ou através de um microcomputador conectado no frontal do relé por meio de uma comunicação serial (GRID, 2011). Por outro lado, diferente dos relés eletrônicos e eletromecânicos, os relés digitais revolucionaram os esquemas de proteção, oferecendo vantagens impossíveis de serem obtidas pelos seus antecessores, sobretudo a possibilidade de integração via rede. Entre suas principais revelações, os relés digitais diferem dos seus antecessores por apresentarem vantajosas características, dentre elas (KUSEL, 2011):

- Flexibilidade na implementação dos algoritmos de proteção, pode-se integrar em um só dispositivo diferentes funções de proteção;
- Flexibilidade funcional, o relé pode ser programado para realizar diversas funções, como medição, monitoramento e controle;
- Integração digital, permite a comunicação entre o relé e outros dispositivos, possibilitando o seu acesso remoto;
- Rotinas de auto-monitoramento, permite que o próprio relé averigue constantemente a integridade de seus componentes;
- Aquisição e armazenamento de dados de oscilografia.

Pode-se afirmar que as vantagens dos relés eletrônicos sobre os eletromecânicos foram ínfimas comparadas com as vantagens dos relés microprocessados sobre os eletromecânicos e os eletrônicos. Os relés digitais incorporaram todas as facilidades que a tecnologia dos microprocessadores oferecem, além de preços competitivos e confiabilidade (FILHO; MAMEDE, 2011).

---

É interessante observar que com o advento da tecnologia digital houve uma mudança brusca no conceito de tempo de vida útil de um sistema de proteção. Os relés eletromecânicos são equipamentos que pela sua construção robusta apresentavam uma vida útil de dezenas de anos. Já a vida útil dos relés digitais é influenciada tanto pelos desgastes dos seus componentes como pelo tempo de obsolescência da tecnologia da informação que faz funcionar o relé. Assim, à medida que os softwares aplicados aos sistemas de proteção digitais adquirem maior poder de programação e lógica, é necessário desenvolver novos relés com a mesma função para poder se beneficiar desses aplicativos (FILHO; MAMEDE, 2011).

Outra mudança sentida pelos profissionais de proteção está ligada à formação técnica. Na época dos relés eletromecânicos de indução, o tempo de treinamento de um técnico de nível médio para ajustar e realizar as manutenções necessárias no relé de um determinado fabricante se restringia a cerca de 10 horas. Com duas ou 3 horas adicionais, o mesmo técnico adquiria conhecimento suficiente para ajustar e realizar manutenção no mesmo tipo de relé de outro fabricante (FILHO; MAMEDE, 2011). Isso ocorria porque os relés de uma mesma função tinham construções muito semelhantes. Atualmente, o perfil técnico desses profissionais mudou significativamente. Agora, o tempo de treinamento de um técnico para ajustar e realizar manutenção num determinado tipo de relé digital de um fabricante pode durar semanas. Se esse mesmo técnico for chamado para realizar os mesmos serviços em um relé de outro fabricante, mas com funções equivalentes, o tempo de treinamento é praticamente o mesmo (FILHO; MAMEDE, 2011).

Com base no exposto nesta revisão bibliográfica, percebe-se que relés microprocessados, em vários aspectos, são inovadores. Embora programas auxiliares terem evoluídos no sentido de facilitar os ajustes dos equipamentos, ainda assim são necessários cálculos de parâmetros, os quais por sua vez, aumentam ainda mais a susceptibilidade a erros por falhas humanas. Logo, observou-se a necessidade de desenvolver uma plataforma que tem por finalidade auxiliar esses cálculos de parametrização, reduzindo possíveis falhas ligadas principalmente a erros humanas, denominada neste trabalho de LIGHTSET.

## CAPÍTULO 3

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos relacionados ao relé SEL-T400L. Será explicado particularmente cada função que é embarcada no relé e seus respectivos ajustes. Sobretudo, todos os conceitos explicados neste capítulo serão de essencial importância para o entendimento do aplicativo retratado neste trabalho.

### 3.1 CONCEITOS BÁSICOS

Durante a operação normal dos SEEs, em regime permanente, os parâmetros das LTs são bem definidos e praticamente constantes, em que as variações encontradas são decorrentes em sua maioria às condições climáticas e vegetação ao longo da região de onde a linha se encontra instalada. Diante disso, quaisquer ocorrências que provoquem modificações relevantes de tais parâmetros podem provocar transitórios no SEE em questão (ZANETTA, 2003; LOPES, 2014b).

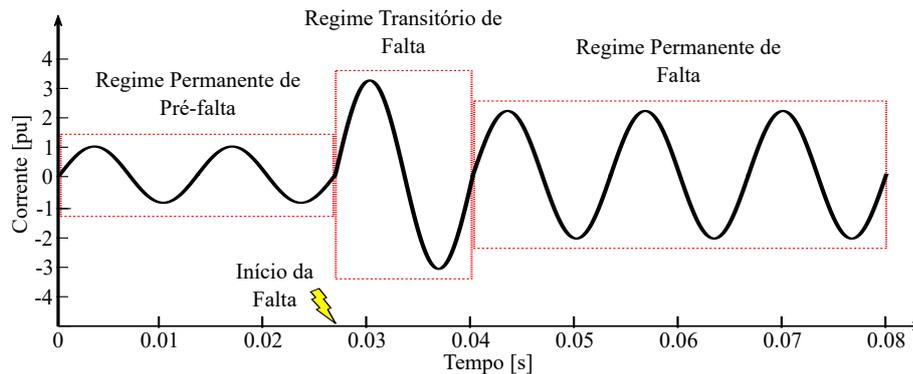
Entre a transição do sistema em operação normal e após ocorrer uma falta, há um período em que ocorrem os transitórios de falta. A partir destes transitórios é possível estimar informações do distúrbio, como a duração do defeito, local do defeito, direcionalidade da falta, tipo e resistência da falta (FAYBISOVICH *et al.*, 2010; SAHA, 2010). Visto isso, é com base nesse intervalo de tempo que o relé no domínio do tempo aplica seus algoritmos de proteção e localização de falta.

Sendo o programa retratado neste trabalho aplicado ao relé SEL-T400L, isto é, um relé no domínio do tempo fundamentado na teoria das ondas viajantes e grandezas incrementais, é de suma importância explicar conceitos básicos sobre estas teorias. Sobretudo, o relé SEL-T400L possui duas funções de proteção baseadas em grandezas incrementais: uma direcional de potência, TD32, e uma de distância, TD21; e duas funções de proteção baseadas em ondas

viajantes: uma direcional de potência, TW32, e uma diferencial de linhas, TW87.

### 3.1.1 Grandezas Incrementais

Assumindo uma falta entre dois terminais na rede elétrica, pode-se usar o teorema de Thévenin, em conjunto com o princípio de superposição, para facilitar os cálculos matemáticos da rede com defeito (SCHWEITZER *et al.*, 2015a). Dessa maneira, é possível representar qualquer sistema com falta, como a contribuição de dois circuitos independentes: um circuito contendo apenas as tensões e correntes de carga, isto é, sistema de pré-falta, e outro de falta contendo apenas as variações das tensões e correntes geradas pela falta, ou seja, sistema puro de falta. Com base na Figura 3.1, observa-se que logo antes de ocorrer um defeito, o sistema opera em regime permanente; por outro lado, após acontecer a falta, o sistema passa por um período transitório de falta para então estabelecer um novo regime permanente com falta.



**Figura 3.1.** Sinais de corrente de uma rede elétrica no período de pré-falta e pós-falta.

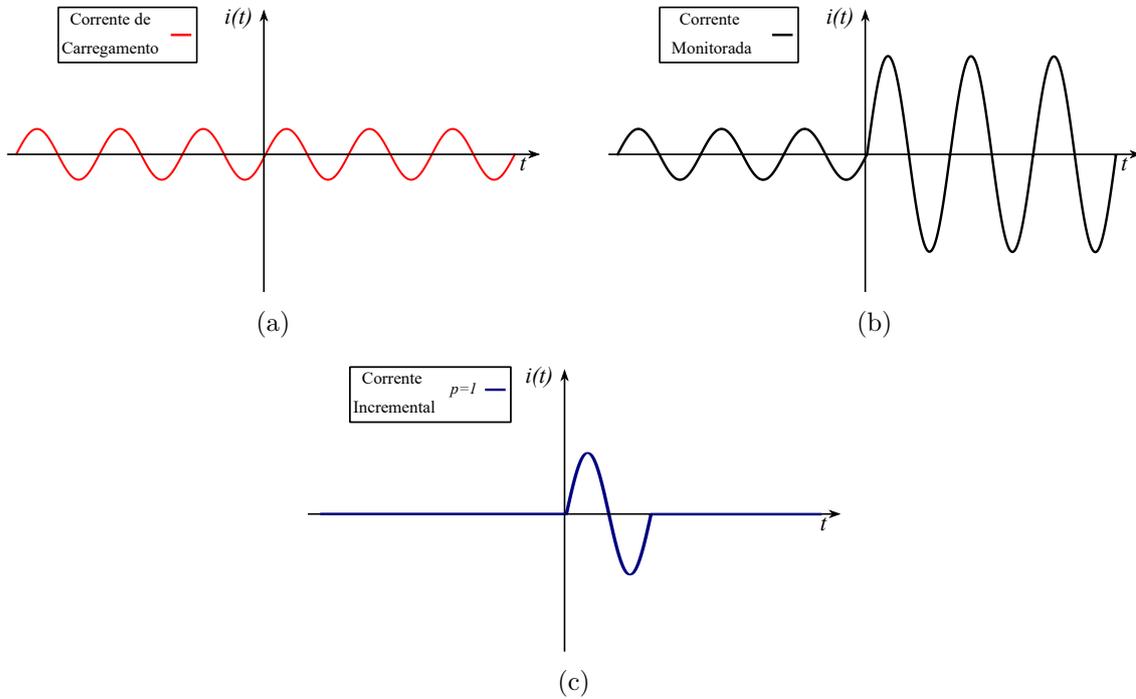
Como o relé mede valores de tensões e correntes instantâneos, um método simples para derivar valores puro de falta, ou simplesmente, grandezas incrementais, é (SCHWEITZER *et al.*, 2015a):

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

onde  $\Delta s(t)$  é a grandeza incremental instantânea,  $s(t)$  é o valor instantâneo medido,  $T$  é o período da grandeza medida e  $p$  é um número arbitrário de períodos.

Em virtude disso, pode-se obter valores de grandezas incrementais que duram  $p$  ciclos de energia. Após esse período, os valores históricos serão do regime permanente de falta, resultando em valores nulos, conforme exemplificado na Figura 3.2.

Constata-se, então, que as funções de proteção do relé baseadas em componentes incrementais são válidas por um curto período proporcional a  $p \cdot T$ , após esse tempo os sinais obtidos não são mais válidos, em razão que todas as amostras se encontram no período de falta (RIBEIRO, 2017; SCHWEITZER *et al.*, 2015b).



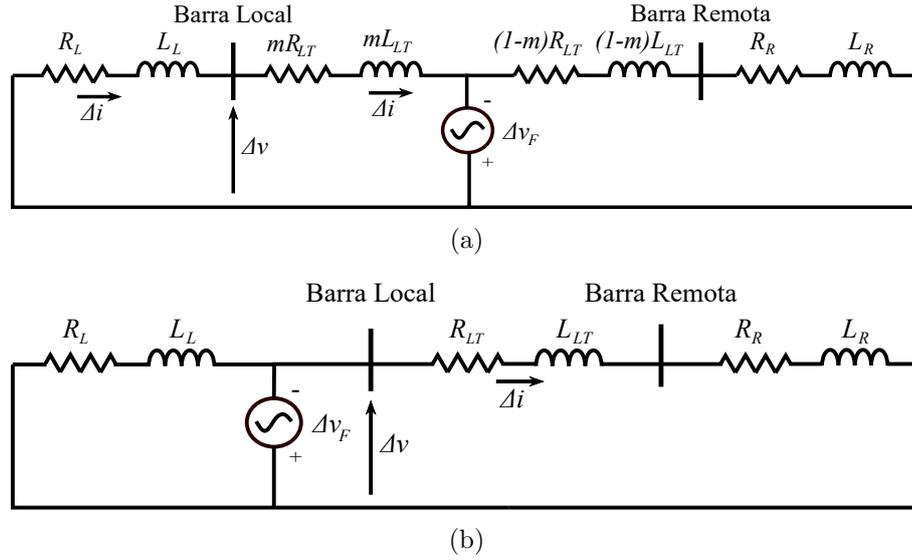
**Figura 3.2.** Sinais de corrente para uma falta: (a) Corrente de carregamento; (b) Corrente monitorada; (c) Corrente incremental obtida para o valor de  $p=1$  (RIBEIRO, 2019).

### 3.1.1.1 Corrente Réplica Incremental

A Figura 3.3 ilustra um SEE como sendo um circuito  $RL$ . Devido à característica indutiva da linha, ocorre uma defasagem angular entre tensões e correntes presentes no sistema. Como forma de compensar essa defasagem, as funções baseadas em grandezas incrementais utilizam a corrente réplica incremental em seus cálculos. Dessa maneira, a corrente réplica incremental possibilita que os elementos de funções de proteção incrementais possuam relações algébricas equivalentes às encontradas nas funções fasoriais tradicionais.

Assim, para se obter a corrente réplica incremental, relacionam-se as correntes e tensões incrementais (SCHWEITZER *et al.*, 2015a):

$$\Delta v = - \left( R_L \cdot \Delta i + L_L \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i \right). \quad (3.2)$$



**Figura 3.3.** Circuito puro de falta e as relações de tensões e correntes incrementais para faltas diretas (a) e faltas reversas (b).

A partir da equação (3.2), normaliza-se utilizando a magnitude da impedância RL conectada à barra Local, obtendo-se então:

$$\Delta v = -|Z_L| \cdot \left( \frac{R_L}{|Z_L|} \cdot \Delta i + \frac{L_L}{|Z_L|} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \Delta i \right). \quad (3.3)$$

Dessa forma, define-se a corrente réplica incremental como:

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

onde:

$$D_0 = \frac{R_L}{|Z_L|}, D_1 = \frac{L_L}{|Z_L|}. \quad (3.5)$$

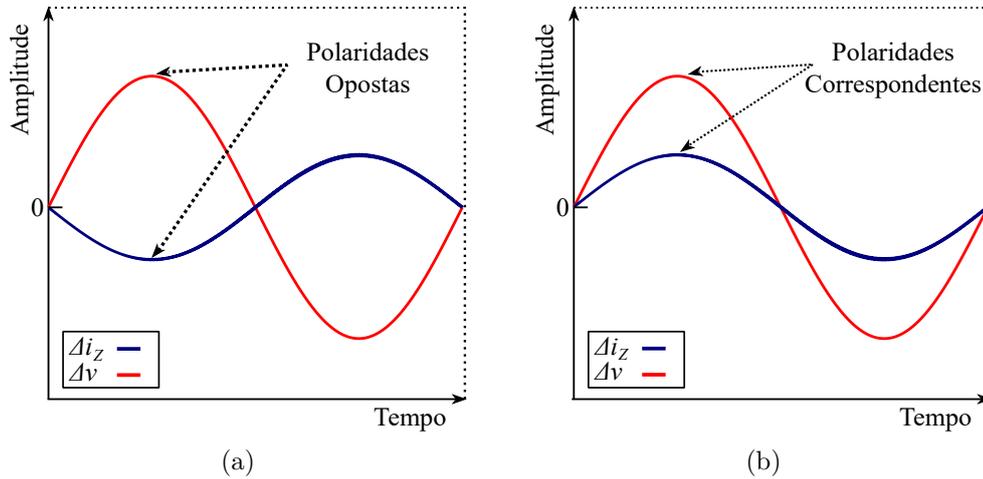
Sobretudo, para determinados valores de coeficientes  $D_0$  e  $D_1$ , obtém-se um ganho unitário entre a corrente medida e a corrente réplica na frequência fundamental do sistema. Além disso, em uma falta direta, é possível definir uma simples equação de tensão e corrente para as grandezas incrementais medidas no terminal local (SCHWEITZER *et al.*, 2015a):

$$\Delta v(t) = -|Z_L| \cdot \Delta i_Z(t). \quad (3.6)$$

Também é possível obter este equacionamento para faltas reversas, colocando a fonte  $\Delta v_F$  atrás do terminal local, conforme é ilustrado na Figura 3.3(b). Nesse caso, a equação de tensão e corrente para a corrente réplica incremental é:

$$\Delta v(t) = |Z_{LT} + Z_R| \cdot \Delta i_Z(t). \quad (3.7)$$

Conforme representado na Figura 3.4, em faltas diretas, as polaridades dos sinais de tensão e corrente são opostas. Enquanto que, em faltas reversas, as polaridades dos sinais são correspondentes. Portanto, a relação entre suas polaridades indica a direção da falta, reduzindo a probabilidade de indicar uma incorreta direcionalidade da falta.



**Figura 3.4.** Relações de tensões e correntes incrementais em faltas diretas (a) e em faltas reversas (b).

Dessa maneira, conclui-se que o uso da corrente réplica incremental permite a análise do sistema como um circuito resistivo, o que facilita as análises no domínio do tempo. Posteriormente, serão retratados os conceitos de grandezas de *loop* de modo a obter relações entre correntes réplica e tensões incrementais medidas na LT, usando parâmetros de linha.

### 3.1.1.2 Loops de falta

O conceito visto anteriormente de corrente réplica foi demonstrado com base em sistemas monofásicos. Expande-se agora este conceito para incluir sistemas trifásicos. Para isso, os elementos direcionais necessitam do uso de *loops* de falta para viabilizar atuações corretas para todos os tipos de curto-circuito. Sobretudo, estes *loops* de falta são relações adaptadas dos *loops* no domínio da frequência (KASZTENNY *et al.*, 2016).

Sendo assim, as tensões e correntes de *loop* são derivadas assumindo curtos monofásicos fase-terra e curtos bifásicos fase-fase. Por fim, apresentam-se os *loops* de falta na Tabela 3.1 (KASZTENNY *et al.*, 2016).

As análises de cada um dos *loops* de falta apresentados na Tabela 3.1 podem ser represen-

**Tabela 3.1.** Loop de tensões e correntes incrementais no domínio do tempo.

<i>Loop de Falta</i>	<i>Tensão Incremental (<math>\Delta v</math>)</i>	<i>Corrente Réplica Incremental (<math>\Delta i_Z</math>)</i>
<i>AT</i>	$\Delta v_A$	$\Delta i_{ZA} - \Delta i_{Z0}$
<i>BT</i>	$\Delta v_B$	$\Delta i_{ZB} - \Delta i_{Z0}$
<i>CT</i>	$\Delta v_C$	$\Delta i_{ZC} - \Delta i_{Z0}$
<i>AB</i>	$\Delta v_A - \Delta v_B$	$i_{ZA} - \Delta i_{ZB}$
<i>BC</i>	$\Delta v_B - \Delta v_C$	$i_{ZB} - \Delta i_{ZC}$
<i>CA</i>	$\Delta v_C - \Delta v_A$	$i_{ZC} - \Delta i_{ZA}$

tadas a partir da equação (3.4) utilizando as seguintes funções:

$$\Delta i_Z = f_{IZ}(\Delta i, R, L), \quad (3.8)$$

$$\Delta i_0 = \frac{1}{3}(\Delta i_A + \Delta i_B + \Delta i_C), \quad (3.9)$$

$$\Delta i_{Z0} = f_{IZ}(\Delta i_0, R_1, L_1) - \frac{|Z_0|}{|Z_1|} \cdot f_{IZ}(\Delta i_0, R_0, L_0), \quad (3.10)$$

$$\Delta i_{ZA} = f_{IZ}(\Delta i_A, R_1, L_1), \quad (3.11)$$

$$\Delta i_{ZB} = f_{IZ}(\Delta i_B, R_1, L_1), \quad (3.12)$$

$$\Delta i_{ZC} = f_{IZ}(\Delta i_C, R_1, L_1), \quad (3.13)$$

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.

### 3.1.2 Princípios das Ondas Viajantes

Durante a ocorrência de faltas em LTs, transitórios eletromagnéticos são induzidos no ponto do defeito, os quais se propagam em direção a ambos os terminais da linha monitorada. Esses transitórios de alta frequência são denominados de ondas viajantes (OVs) (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Por certo, uma falta em uma LT gera OVs que se propagam do local do defeito para os terminais da linha com velocidade de propagação que depende da distribuição de indutância e capacitância da LT. Além disso, pode-se determinar tensão e corrente em função da posição da onda e do tempo (SCHWEITZER *et al.*, 2015a), que são utilizadas nas funções de proteção e localização de faltas embarcadas no SEL-T400L.

Sobretudo, o princípio de operação das funções de proteção baseadas em OV's do SEL-T400L constitui-se a partir da comparação entre grandezas que contabilizam as informações de amplitude, polaridade e tempos de propagação das OV's incidentes nos terminais da LT (SEL, 2019).

### 3.1.2.1 Modelos de LTs

No geral, as LTs podem ser modeladas segundo dois tipos de modelos: modelo a parâmetros concentrados e modelo a parâmetros distribuídos. O modelo a parâmetro concentrados representa uma LT com elementos concentrados em um nó, tipicamente calculados em uma única frequência. Além disso, variações em um terminal da linha são instantaneamente percebidas no outro. Enquanto que, o modelo a parâmetros distribuídos representa de forma mais precisa as LTs, principalmente de linhas longas quando se deseja representar a propagação de OV's (SAHA, 2010). Pois, uma vez considerados parâmetros distribuídos, os sinais de tensão e corrente passam a ser função do espaço e tempo, dando a ideia de propagação ao longo das LTs com variações temporais (GLOVER *et al.*, 2011).

Visto isso, ao trabalhar com OV's, altas frequências são avaliadas, de modo que as dimensões físicas das LTs e os comprimentos de onda dos sinais avaliados passam a ter a mesma ordem de grandeza, requerendo a modelagem das LTs em modelos mais precisos. Sobretudo, em LTs longas, as OV's possuem um tempo para se propagarem entre os terminais que não pode ser desprezado, tempo este que é utilizado pelas funções de proteção do SEL-T400L, justificando dessa maneira a necessidade do uso de modelos a parâmetros distribuídos.

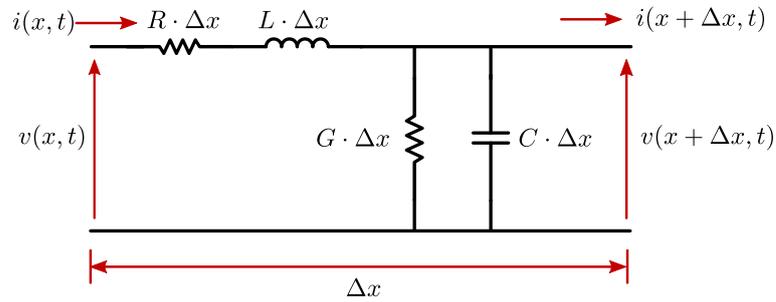
### 3.1.2.2 Propagação de OV's em Sistemas de Transmissão

Tipicamente em LTs aéreas, quando acontece uma falta, OV's de tensão e corrente são lançadas a partir do local da falta em direção aos terminais da LT. Elas se propagam aproximadamente na velocidade da luz em LTs aéreas e devido à variabilidade observada quanto ao local de ocorrência da falta, as OV's chegam nos terminais local e remoto em momentos distintos (SLUIS, 2001). Visto isso, infere-se a importância de analisar LTs modeladas a parâmetros distribuídos, permitindo a análise dos tempos de chegada das OV's nos pontos de medição.

Diante disso, a Figura 3.5 ilustra um segmento de LT de tamanho infinitesimal  $\Delta x$ , contendo resistência  $R$ , indutância  $L$ , condutância  $G$  e capacitância  $C$  por unidade de comprimento (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Utilizando as Leis de Kirchhoff de tensão e corrente, pode-se relacionar matematicamente as tensões e correntes com os pontos  $x$  e  $\Delta x$ :

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (3.14)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t}. \quad (3.15)$$



**Figura 3.5.** LT modelada a parâmetros distribuídos (SCHWEITZER *et al.*, 2014).

Uma informação importante nos estudos de OV's é a impedância característica da LT ( $Z_c$ ), a qual é definida pela razão entre ondas de tensão e corrente, mantendo-se constantes tanto para a razão entre as componentes incidentes como para as refletidas, tal expressão é resultada da manipulação das equações (3.14) e (3.15):

$$Z_c = \frac{v_I}{i_I} = -\frac{v_R}{i_R} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}. \quad (3.16)$$

Além disso, assumindo que o estudo de OV's estará normalmente relacionado à análise de componentes de alta frequência, pode-se desprezar as perdas na LT, resultando em uma impedância de surto ( $Z_s$ ) (RIBEIRO, 2017):

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3.17)$$

A partir da Figura 3.6, deve-se entender que a amplitude das ondas lançadas depende de características da falta e do sistema, de modo que as amplitudes das OV's de tensão e correntes para um sistema monofásico podem ser calculadas da seguinte maneira (RIBEIRO *et al.*, 2018):

$$V_{ov} = \frac{Z_s \cdot V_{nom} \cdot \text{sen } \theta}{Z_s + 2 \cdot R_f}, \quad (3.18)$$

$$i_{ov} = \frac{V_{ov}}{Z_s} = \frac{V_{nom} \cdot \text{sen } \theta}{Z_s + 2 \cdot R_f}, \quad (3.19)$$

onde,  $R_f$  é a resistência de falta,  $Z_s$  é a impedância de surto,  $V_f$  é a tensão de pré-falta ( $V_f \approx V_{nom} \cdot \text{sen } \theta$ ),  $V_{ov}$  é a amplitude da OV de tensão e  $i_{ov}$  é a amplitude da OV de corrente.

Dessa maneira, infere-se que a depender das características do sistema e da falta, diferentes intensidades de atenuações das OVs podem ser identificadas nos eventos de falta.

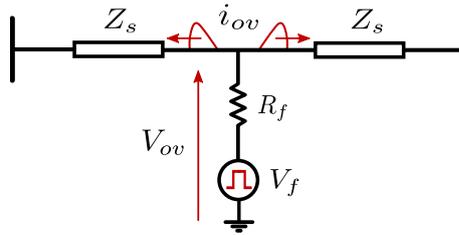


Figura 3.6. OVs de tensão lançadas na LT (RIBEIRO, 2019).

## 3.2 FUNÇÕES AUXILIARES DO RELÉ SEL-T400L

Antes de adentrar nas funções do relé SEL-T400L, é de suma importância apresentar conceitos de algumas funções auxiliares. Estes elementos auxiliares são utilizados nas funções de proteção baseadas em grandezas incrementais e em OVs.

### 3.2.1 Arming Logic

Esta função auxiliar verifica as condições do sistema para garantir uma operação segura dos elementos de proteção no domínio do tempo. Se esta função for desativada, o relé inibe a operação do elemento TD32, TW32, TD21 e TW87. O objetivo desta função é verificar se a LT protegida está energizada e se não há transitórios excessivos antes de uma falta, isto é, verificar se os sinais de tensão e corrente estão em regime permanente. Para esta lógica não há configurações dedicadas e, portanto, não se faz necessário configurá-la (SEL, 2019).

### 3.2.2 Starting Logic

O SEL-T400L possui uma função de detecção de distúrbios não-direcional aplicada aos elementos de proteção baseados em grandezas incrementais denominada de *Starting Logic*.

O objetivo principal desta função é monitorar continuamente os *loops* de falta associados à proteção em sistemas trifásicos, liberando os elementos de proteção para os *loops* afetados pelo defeito e impedindo a atuação dos elementos não sensibilizados. Além disso, esta função auxiliar impede operações quando há apenas pequenos sinais incrementais próximos do estado de regime permanente, quer dizer, que não é um evento que possa vir a ser classificado como um curto-circuito. Para esta lógica não há configurações dedicadas e, portanto, não se faz necessário configurá-la (SEL, 2019).

### 3.2.3 Supervisão por Sobrecorrente

O SEL-T400L aplica uma supervisão por sobrecorrente para garantir maior segurança na diferenciação de eventos de faltas com outros eventos que possuem baixa quantidade energética, como chaveamentos de banco de capacitores. Dessa maneira, o SEL-T400L possui três elementos de sobrecorrente para seis *loops* de falta cada: OCTP, OC87 e OC21.

O elemento OCTP de supervisão por sobrecorrente do esquema de teleproteção POTT, auxilia as funções direcional de potência baseadas em grandezas incrementais e OV, TD32 e TW32, respectivamente. Sendo assim, o esquema POTT só envia o *trip* após confirmada a supervisão por sobrecorrente. Além disso, o relé possui um segundo elemento de supervisão por sobrecorrente, a OC87, que supervisiona a operação do esquema de proteção da função diferencial de linha, TW87. Por fim, o terceiro elemento de supervisão por sobrecorrente, a OC21, supervisiona a operação da função de proteção de distância, TD21.

Todavia, enquanto que a OCTP e a OC21 são elementos direcionais de sobrecorrente, o OC87 é não-direcional. Além disso, o OCTP e o OC87 são obtidos a partir de estudos de curto-circuito realizados pelo usuário, diferente da OC21, que é determinada internamente no dispositivo.

## 3.3 FUNÇÕES DE PROTEÇÃO DO RELÉ SEL-T400L

Conforme retratado anteriormente, o SEL-T400L é fundamentado em proteções baseadas em grandezas incrementais, TD21 e TD32; e em proteções baseadas em OV, TW32 e TW87.

Além disso, este relé no domínio do tempo possui funções auxiliares essenciais para garantir segurança, velocidade e confiabilidade na proteção.

### 3.3.1 Time Domain - TD32

A função direcional de potência aplicada no domínio do tempo se baseia no princípio das grandezas incrementais. Partindo do conceito de elementos direcionais tradicionais, essa função baseia-se na diferença de polaridade entre as tensões e correntes incrementais para determinar a direcionalidade do defeito. Destaca-se também que esta proteção atua por meio do esquema de teleproteção POTT, quer dizer, a emissão de *trip* para a abertura dos disjuntores das fases com defeito só é realizada após a confirmação de falta direta pelos relés instalados nas duas pontas da LT monitorada. Assim, garante-se proteção unitária à linha a partir do momento em que ambos os elementos identificam falta direta ao terminal monitorado (RIBEIRO, 2017; RIBEIRO, 2019).

#### 3.3.1.1 Fundamentação da TD32

A TD32 utiliza valores incrementais de tensão e incrementais de corrente réplica. Além disso, o relé se baseia em análises considerando a linha como um sistema equivalente RL, simplificando as equações operacionais da TD32 (KASZTENNY *et al.*, 2016).

O elemento TD32 se baseia em um torque, ou seja, em um produto da tensão incremental e da corrente réplica incremental. Por sua vez, as grandezas envolvidas neste produto são proporcionais, quer dizer, para faltas diretas, a corrente réplica incremental e a tensão incremental, possuem polaridades opostas; e para faltas reversas, suas polaridades são iguais. Todavia, o relé inverte o sinal do torque de operação de tal forma que as faltas diretas geram torques positivos e as faltas reversas geram torques negativos (SCHWEITZER *et al.*, 2015b).

Diante do exposto, utilizando as relações entre tensões e correntes incrementais, pode-se definir o torque de operação como sendo o negativo do produto entre tensão incremental e corrente réplica incremental (SCHWEITZER *et al.*, 2015a):

$$T_{OP}(t) = -\Delta v(t) \cdot \Delta i_Z(t). \quad (3.20)$$

Substituindo as equações (3.6) e (3.7) na equação (3.20), observa-se o seguinte resultado para faltas diretas e reversas, respectivamente:

$$T_{OP}(t) = |Z_L| \cdot (\Delta i_Z(t))^2, \quad (3.21)$$

$$T_{OP}(t) = -|Z_{LT} + Z_R| \cdot (\Delta i_Z(t))^2. \quad (3.22)$$

A princípio, analisando a equação (3.20), o elemento direcional poderia comparar o valor do torque de operação com zero, para determinar a falta. Todavia, adicionando limiares adaptativos para faltas diretas e reversas, melhora-se a segurança e a confiabilidade quando sinalizada uma falta. Portanto, definem-se matematicamente esses limiares adaptativos como (RIBEIRO, 2019):

$$T_{FWD}(t) = TD32ZF \cdot (\Delta i_Z(t))^2, \quad (3.23)$$

$$T_{REV}(t) = -TD32ZR \cdot (\Delta i_Z(t))^2, \quad (3.24)$$

onde  $T_{FWD}$  e  $T_{REV}$  são os limiares de restrição adaptativos para faltas diretas e reversas, respectivamente; e o TD32ZF e o TD32ZR são impedâncias de ajuste do relé SEL-T400L que serão detalhadas posteriormente.

Por fim, o elemento direcional afirma ser uma falta direta quando o torque de operação é maior que o torque de falta direta; e afirma ser uma falta reversa quando o torque de operação é menor que o torque reverso, os quais são representados, respectivamente, por:

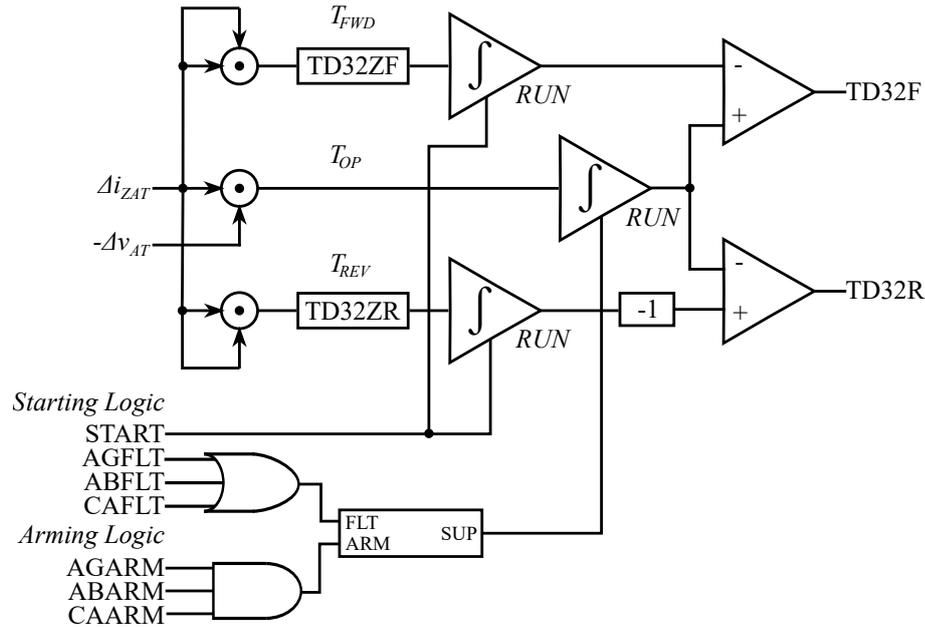
$$T_{OP}(t) > T_{FWD}(t), \quad (3.25)$$

$$T_{OP}(t) < T_{REV}(t). \quad (3.26)$$

Ao implementar o elemento TD32, o SEL-T400L utiliza *loops* de falta para cobrir todos os tipos de faltas. Em suma, a função direcional de potência atua por meio do esquema POTT. Além disso, esta função pode ser usada para supervisionar o elemento TD21 e, em algumas aplicações, pode supervisionar também o esquema de proteção TW87. Sendo assim, é fundamental configurar corretamente e precisamente o TD32ZF e o TD32ZR, independente de qual elemento de proteção esteja ativado e configurado para disparar.

### 3.3.1.2 Implementação e Configuração da TD32 no SEL-T400L

Conforme a fundamentação da proteção TD32, apresenta-se na Figura 3.7 o diagrama lógico simplificado da TD32 para um *loop* de falta AT. Sobretudo, reitera-se que para a cobertura de todos os tipos de faltas nos sistemas elétricos trifásicos, é necessário analisar todos os de *loops* de falta.



**Figura 3.7.** Diagrama lógico simplificado da TD32 para o *loop* AT (SEL, 2019).

Tendo como objetivo obter indicações confiáveis e precisas, a TD32 integra os torques de restrição e de operação, obtendo-se, então, energias. O controle do integrador dos limiares adaptativos é baseado no início do distúrbio, apresentado na Figura 3.7 pela *wordbit* START. Enquanto que, a integração do torque de operação é obtida quando pelo menos uma das grandezas de *loop* é associada à falta, satisfazendo a *Starting Logic*, e se a linha protegida estava em regime de pré-falta, satisfazendo a *Arming Logic* (RIBEIRO, 2019).

É possível determinar se o defeito se encontra à frente ou atrás do terminal de referência comparando as grandezas integradas de operação e restrição. Quando a operação excede a restrição para faltas diretas, ativa-se a *wordbit* TD32F. Por outro lado, quando o torque de operação integrado é menor que a grandeza de restrição integrada, ativa-se a *wordbit* TD32R.

Por conveniência, a lógica da TD32 agrega três *word-bits* da TD32F em apenas uma. Sobre- tudo, cada uma desses três *word-bits* corresponde à fase envolvida no defeito e do mesmo modo

acontece para a TD32R. Este processo é feito devido ao fato que a TD32 baseia sua operação por *loop* de falta.

Em suma, é relevante citar que a lógica da TD32 adiciona aos torques de restrição  $T_{FWD}$  e  $T_{REV}$  um valor de *offset* fixo visando cobrir casos em que a corrente réplica incremental de *loop* é muito baixa e produz um torque de restrição pequeno. (SEL, 2019).

Por fim, na Tabela 3.2, é apresentado as configurações necessárias do elemento TD32 para o SEL-T400L. Posteriormente, esses ajustes serão mais detalhados.

**Tabela 3.2.** Ajustes da função de proteção TD32.

Ajuste	Descrição
TD32ZF	Impedância do limiar adaptativo para faltas diretas ( $\Omega$ ,secundário).
TD32ZR	Impedância do limiar adaptativo para faltas reversas ( $\Omega$ ,secundário).

### 3.3.2 Time Domain - TD21

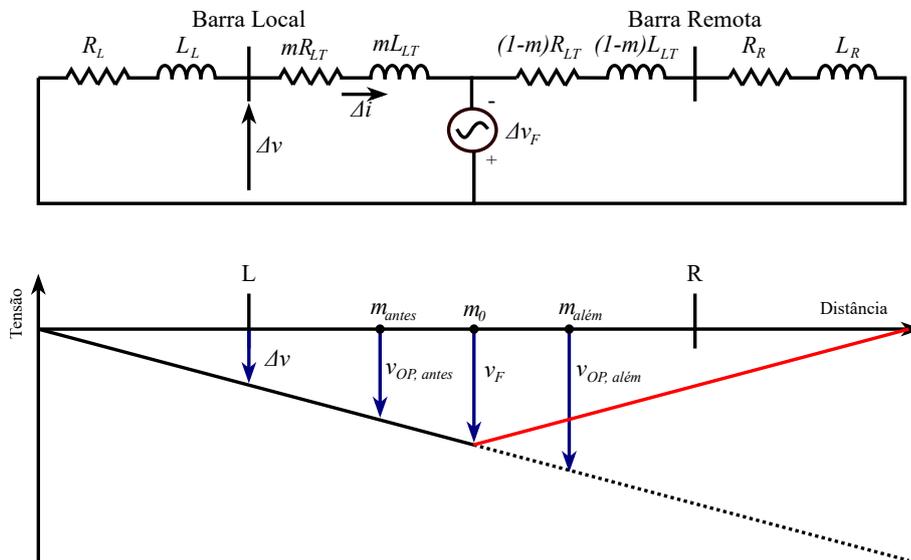
A função de distância para LTs aplicada no domínio do tempo se baseia no princípio das grandezas incrementais, sendo ela denominada *Time Domain 21*, ou resumidamente TD21. Partindo do conceito de elementos de subalcance tradicionais, essa função baseia-se na tensão instantânea no ponto de alcance definido usando a corrente réplica incremental e a tensão incremental de *loop*. Destaca-se também que esta proteção atua por meio de relés individuais nos terminais da linha ou por meio do esquema de teleproteção de transferência direta de *trip* por subalcance, isto é, DTT (*Direct Transfer Trip*), quando dois relés conectados aos terminais da LT se encontram disponíveis e comunicando por meio de um canal de comunicação. Isso garante a emissão de um *trip* assim que uma falta é identificada dentro da zona protegida, a qual tem comprimento menor que o da LT monitorada, assim como nas funções de distância tradicionais baseadas em fasores (RIBEIRO, 2017).

#### 3.3.2.1 Fundamentação da TD21

O elemento TD21 opera com base na comparação entre tensões de operação e restrição criadas para determinar se uma falta é interna ou externa à zona protegida. Nessa proteção

são utilizados valores incrementais e de pré-falta (SCHWEITZER *et al.*, 2015b). Além disso, por ser um elemento de subalcançe, a TD21 não pode operar em conjunto com a TD32 e a TW32 no esquema POTT, visto que esse é um esquema de proteção baseado em elementos de sobrealcançe.

Para o melhor entendimento da função TD21, a Figura 3.8 ilustra o perfil de tensão estimado pelo relé para um sistema elétrico. Partindo do suposto que o relé só possui medições de apenas um terminal, não se consegue medir o perfil triangular da LT, mas sim uma reta desse perfil. Ou seja, os valores após o ponto da falta serão uma projeção do perfil de tensão estimado. Após traçado o perfil de tensão, obtém-se relações bem definidas para as grandezas analisadas.



**Figura 3.8.** Perfil de tensão estimado pelo relé para um sistema elétrico com falta.

Visto isso, assumindo o pior caso, um curto-circuito franco, obtém-se:

$$| -v_F(t) | = |v_{F,PRE}(t)|, \quad (3.27)$$

em que,  $v_F(t)$  e  $v_{F,PRE}(t)$  são a tensão de falta e de pré-falta no ponto de falta, respectivamente.

Sabe-se que as LTs dos SEEs são ajustadas para que a queda de tensão ao longo dos seus condutores seja ínfima, mantendo uma regulação de tensão previsível (GLOVER, 2011). Em virtude disso, infere-se que uma mesma tensão de pré-falta pode ser encontrada durante todo o comprimento da LT, todavia, para tornar mais confiável essa aproximação, a tensão no ponto de falta,  $v_F(t)$ , é expressa matematicamente sendo a tensão de pré falta no ponto de

alcance da TD21:

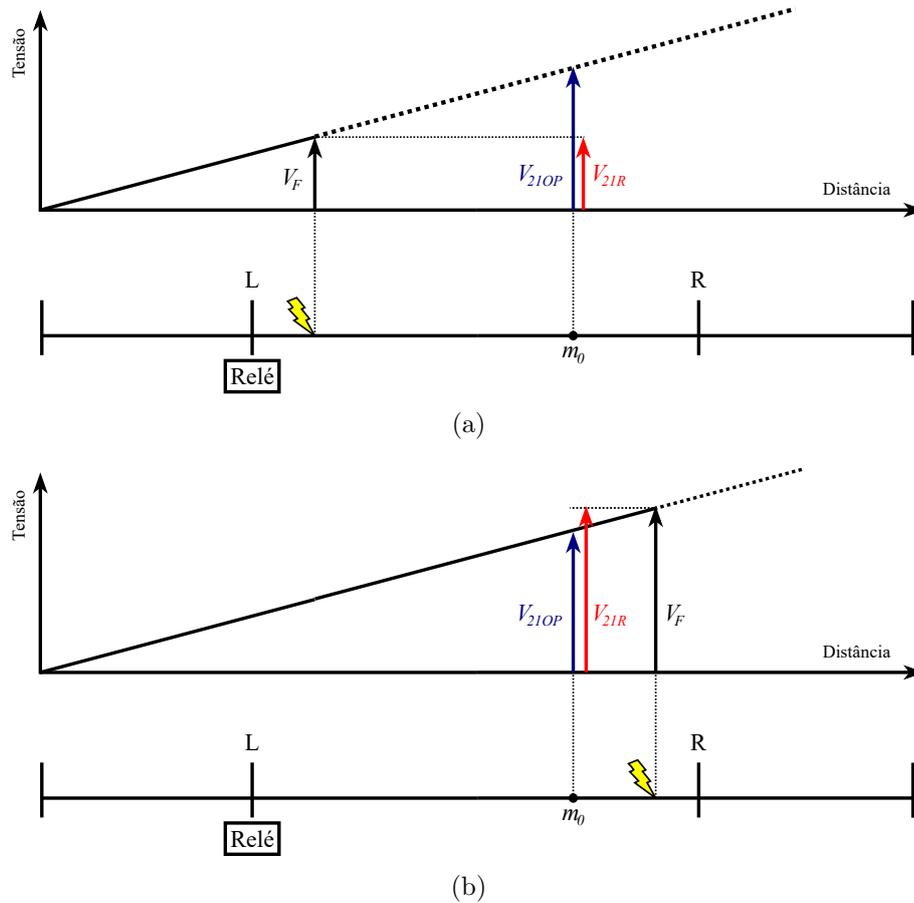
$$v_F(t) = v_{PRE}(t) - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot i_{Z,PRE}(t), \quad (3.28)$$

onde  $m_0$  é o ponto de alcance,  $v_{PRE}(t)$  e  $i_{Z,PRE}(t)$  são valores medidos de tensão e corrente réplica no regime de pré-falta, respectivamente.

Considerando o que foi apresentado, define-se um algoritmo de distância no domínio do tempo que verifica a presença de um defeito na zona de proteção por meio de uma comparação entre duas tensões no ponto de alcance  $m_0$ : uma tensão de operação calculada a partir de valores incrementais de tensão e corrente réplica,  $V_{21OP}(t)$ , e uma tensão de restrição calculada a partir de valores de tensão e corrente réplica medidas no regime de pré-falta,  $V_{21R}(t)$ :

$$V_{21OP}(t) = \Delta v(t) - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot \Delta i_Z(t), \quad (3.29)$$

$$V_{21R}(t) = v_{PRE}(t) - m_0 \cdot |Z_{LT}| \cdot i_{Z,PRE}(t). \quad (3.30)$$



**Figura 3.9.** Relações entre as tensões de operação e restrição para faltas internas (a) e faltas reversas (b).

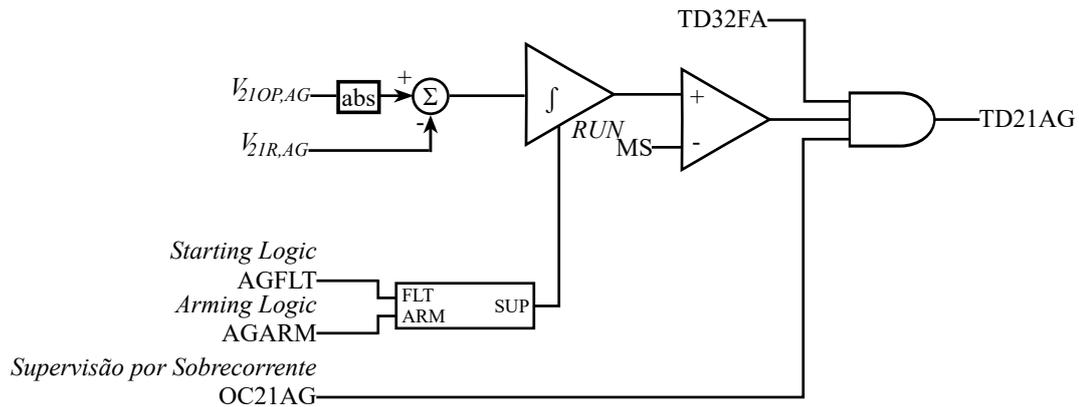
A Figura 3.9 apresenta perfis de tensão para dois casos: quando a falta é interna à LT,

Figura 3.9(a), e quando a falta é externa à LT, Figura 3.9(b). É possível inferir que para faltas internas,  $V_{21OP}(t) > V_{21R}(t)$ , e para faltas externas,  $V_{21OP}(t) < V_{21R}(t)$  (SEL, 2019).

Por fim, ao implementar o elemento TD21, o relé utiliza as relações de *loop* de falta para calcular  $V_{21OP}(t)$  e  $V_{21R}(t)$ . Logo, o elemento fornece configuração de alcance independente para os elementos de fase e terra, TD21MP e TD21MG, respectivamente (KASZTENNY *et al.*, 2016).

### 3.3.2.2 Implementação e Configuração da TD21 no SEL-T400L

Conforme a fundamentação da proteção TD21, apresenta-se na Figura 3.10 o diagrama lógico simplificado da TD21 para um *loop* de falta AT. Sobretudo, a lógica opera independentemente cada um dos seis circuitos de medição de proteção calculando a diferença entre o sinal de operação e o sinal de restrição.



**Figura 3.10.** Diagrama lógico simplificado da TD21 para o *loop* de falta AT (SEL, 2019).

Primeiramente, é calculada a diferença entre  $|V_{21OP}(t)|$  e  $V_{21R}(t)$ . Essa diferença deve ser integrada. Entretanto, para que o integrador seja ativado, as seguintes condições devem ser atendidas: o *loop* de falta sob análise deve satisfazer a *Starting Logic* e a *Arming Logic*, quer dizer, o *loop* de falta deve identificar um distúrbio e é preciso que o *loop* possua valores de tensões e correntes estabilizadas antes da falta. Após disparado o integrador, é aplicada uma margem de segurança MS para maior confiabilidade da proteção. Para confirmar a natureza do distúrbio, aplica-se uma supervisão por sobrecorrente, que verificará se o evento avaliado possui corrente suficiente para ser um curto. Por fim, aplica-se uma supervisão pela proteção TD32, que deve identificar uma falta direta no *loop* analisado.

Por fim, na Tabela 3.3, são apresentadas as configurações necessárias do elemento TD21 para o SEL-T400L. Posteriormente, esses ajustes serão mais detalhados.

**Tabela 3.3.** Ajustes da função de proteção TD21.

Ajuste	Definição
TD21MP	Alcance para os <i>loops</i> de falta bifásicos ( <i>pu</i> ).
TD21MG	Alcance para os <i>loops</i> de falta monofásicos ( <i>pu</i> ).

### 3.3.3 *Traveling Wave* - TW32

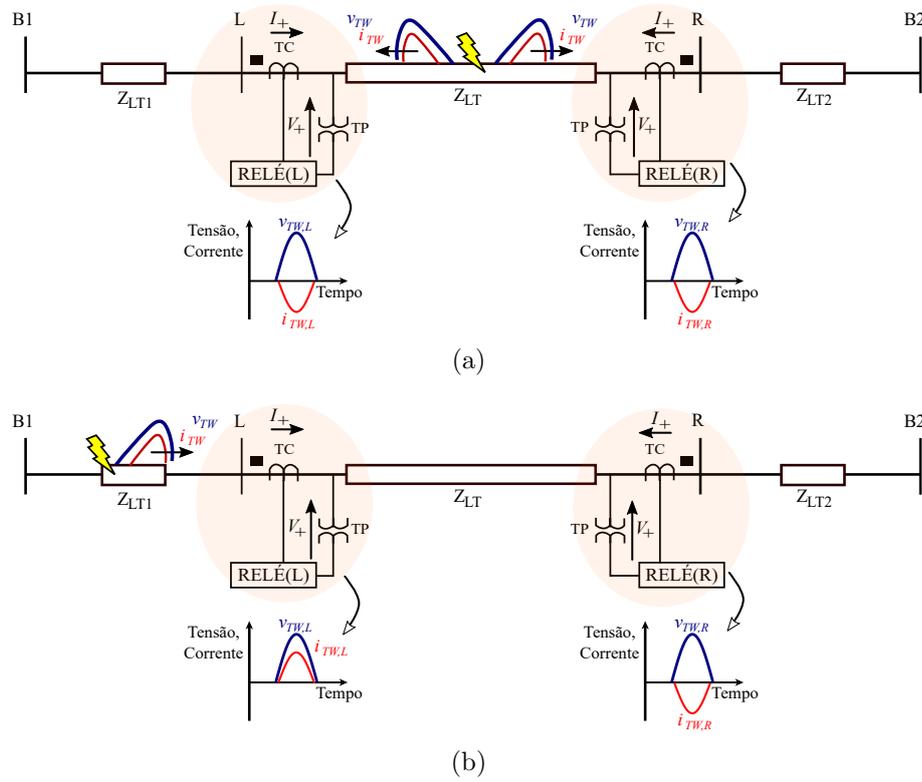
A função direcional de potência baseada no princípio de OV<sub>s</sub>, ou simplesmente TW32, não necessita de ajustes. Responsável por monitorar as primeiras ondas incidentes de corrente e tensão nos terminais da linha, esta função consegue determinar a direcionalidade do defeito e, adicionalmente, consegue se comunicar com a TD32 por meio do esquema de teleproteção POTT. Em suma, devido a sua elevada velocidade de atuação, a TW32 acelera o sinal permissivo no esquema de teleproteção POTT. Por outro lado, por não garantir sozinha o *trip*, acaba não afetando a segurança do esquema de proteção (SEL, 2019).

#### 3.3.3.1 Fundamentação da TW32

O elemento direcional TW32, assim como a TD32, compara o valor relativo de polaridade entre correntes e tensões medidas quando se tem a presença de defeitos diretos ou reversos na LT. Todavia, a comparação na TW32 é feita utilizando OV<sub>s</sub>.

Quando um defeito acontece na LT, OV<sub>s</sub> de tensão e corrente são lançadas em direção aos seus terminais. Assim, a TW32 utiliza essas ondas lançadas na rede elétrica comparando suas polaridades em cada terminal da linha. Com base no sistema apresentado na Figura 3.11, para faltas diretas, as OV<sub>s</sub> de tensão e corrente têm polaridades opostas e, para as reversas, as OV<sub>s</sub> possuem as mesmas polaridades. Dessa forma, para esse elemento, pode-se obter uma lógica de operação baseada nas polaridades relativas entre OV<sub>s</sub> de tensão e corrente, de forma que, por meio do esquema POTT, a proteção atua apenas se ambas as unidades da TW32 nos terminais da linha sinalizarem curtos diretos, quer dizer, OV<sub>s</sub> com polaridades opostas (KASZTENNY

et al., 2016).



**Figura 3.11.** Polaridade das OV's para uma falha interna (a) e para uma falha externa (b) (RIBEIRO, 2017).

Define-se então, para a TW32, um torque de operação sendo o produto entre o negativo da OV de tensão e a OV de corrente:

$$T_{32OP}(t) = -v_{TW}(t) \cdot i_{TW}(t), \quad (3.31)$$

onde,  $v_{TW}(t)$  e  $i_{TW}(t)$  são os sinais de OV's de tensão e corrente, respectivamente.

Infere-se então, para faltas diretas, que  $T_{32OP}(t)$  será positivo e, para faltas reversas, negativo. Por fim, para garantir maior segurança e confiabilidade à proteção, a TW32 utiliza uma condição de atuação mínima:

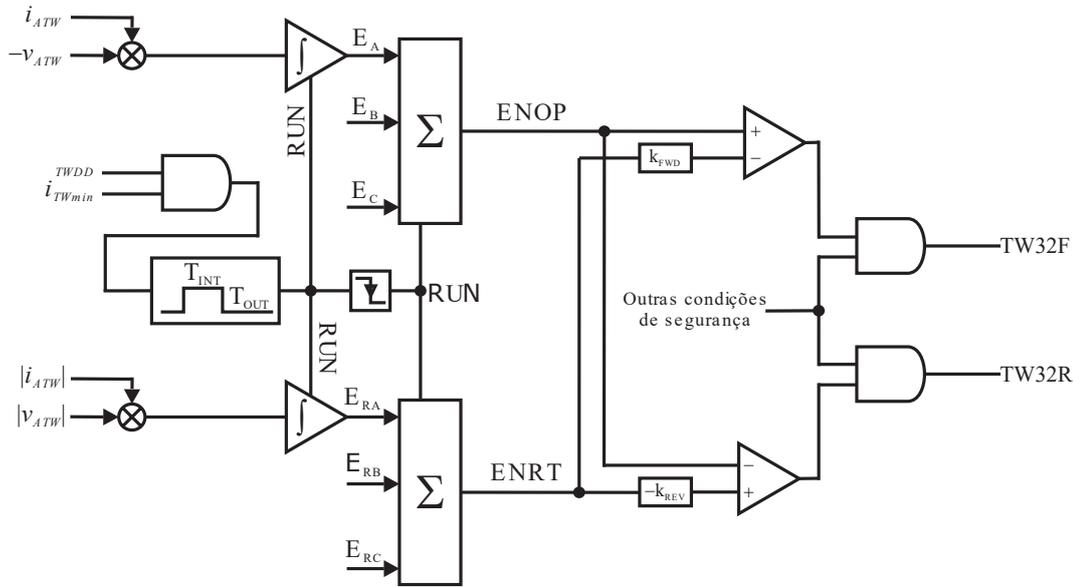
$$T_{32OP}(t) > T_{32OP,min}(t), \quad (3.32)$$

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

### 3.3.3.2 Implementação e Configuração da TW32 no SEL-T400L

A Figura 3.12 apresenta o diagrama lógico simplificado da TW32. Ressalta-se que as OV's de tensão e corrente são extraídas de cada fase por meio de um filtro com janela de  $100 \mu s$ ;

isso implica na análise voltada para a primeira onda incidente, minimizando o efeito das ondas subsequentes. Além disso, após o filtro DS, aplica-se um filtro passa-altas. Por fim, retira-se a componente de modo zero das OV's extraídas por fase, obtendo-se as OV's de tensão e corrente utilizadas pela TW32, conforme ilustrado na Figura 3.12 para a fase A,  $v_{ATW}(t)$  e  $i_{ATW}(t)$  (RIBEIRO, 2019).



**Figura 3.12.** Diagrama lógico simplificado da TW32 (RIBEIRO, 2019).

Extraídas as OV's de interesse, a TW32 calcula um torque de operação definido como o produto entre o negativo da OV de tensão e a OV de corrente,  $-v_{ATW}(t)$  e  $i_{ATW}(t)$ , respectivamente. Sendo assim, os torques de operação são positivos para faltas diretas e negativos para faltas reversas. Ademais, o torque obtido é integrado para se chegar na energia operacional. É importante ressaltar que o integrador só é acionado quando a OV de corrente, em qualquer fase, excede um limite mínimo, e o detector de distúrbios por OV's é ativado,  $TWDD$ .

A integração do torque resulta em uma energia operacional para cada fase:  $E_A$ ,  $E_B$  e  $E_C$ . A energia operacional do evento,  $ENOP$ , é a soma das energias de cada fase, ou seja,  $ENOP = E_A + E_B + E_C$ . A TW32 também integra o produto de valores absolutos das OV's de tensão e corrente para obter a energia total de restrição trifásica,  $ENRT = E_{RA} + E_{RB} + E_{RC}$ . O sinal  $ENRT$  serve como um limitador adaptável, uma porcentagem da restrição, para avaliar o sinal  $ENOP$ .

Dessa forma, terminada a integração da TW32, a lógica verifica a energia operacional  $ENOP$  com relação à energia restritiva  $ENRT$ . Se  $ENOP > k_{FWD} \cdot ENRT$ , a lógica declara um defeito

direto; caso contrário, se  $ENOP < k_{FWD} \cdot ENRT$ , a lógica declara um distúrbio reverso (SEL, 2019).

Por fim, visando sempre garantir maior confiabilidade à proteção, o SEL-T400L aplica à TW32 outras lógicas de proteção antes de sua real atuação. Sobretudo, devido a sua simplicidade de princípios operacionais, o elemento direcional TW32 não requer configurações pelo usuário.

### 3.3.4 *Traveling Wave* - TW87

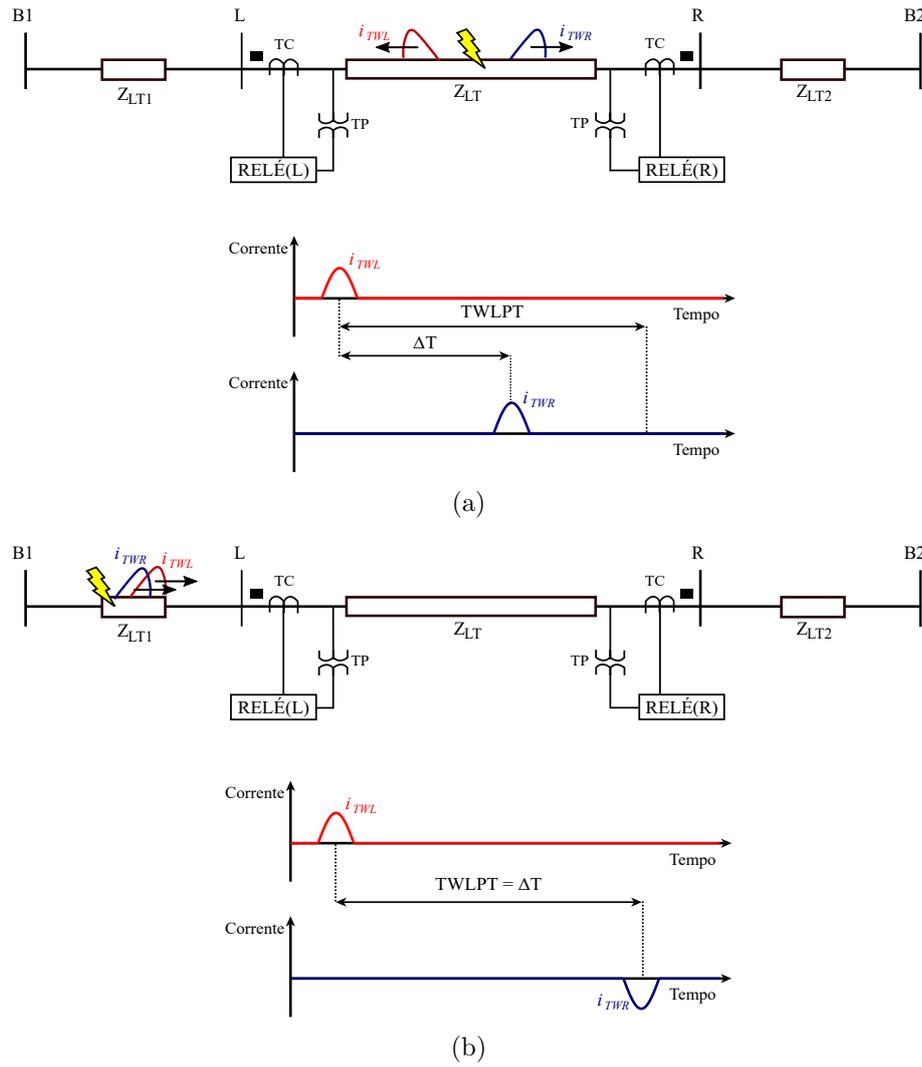
A função diferencial de linha baseada no princípio de OV's, ou simplesmente TW87, é responsável por comparar as OV's de corrente utilizando um canal de comunicação dedicado para sincronismo de amostras entre ambos os relés instalados nos terminais da LT. Dessa forma, este elemento consegue identificar se uma falta é interna ou externa à LT protegida com base na magnitude, polaridade e tempo de propagação de OV's.

#### 3.3.4.1 Fundamentação da TW87

O elemento TW87, por se basear em OV's, requer técnicas confiáveis de filtragem que são necessárias para estimar o tempo de chegada e amplitude das OV's de corrente induzidas pela falta. A partir dessa filtragem, são obtidas OV's de corrente locais e remotas, sendo elas definidas aqui como  $i_{TWL}(t)$  e  $i_{TWR}(t)$ , respectivamente.

Em sua aplicação, a TW87 utiliza sinais de operação e restrição. Sabe-se que, para uma falta interna, uma OV que entrou em um terminal com determinada polaridade, deixa o outro terminal com a mesma polaridade. Enquanto que, para uma falta externa, as OV's que chegam em cada terminal possuem polaridades opostas.

Sendo assim, para melhor entendimento, na Figura 4.5 é apresentado as OV's de corrente medidas nos terminais local e remoto da LT protegida para faltas internas e externas;  $\Delta T$  representa o intervalo de tempo entre a chegada das primeiras OV's em cada terminal,  $TWLPT$  representa o período de propagação da linha. Observa-se então, para faltas internas,  $\Delta T < TWLPT$ , por outro lado, para faltas externas,  $\Delta T = TWLPT$  (SCHWEITZER *et al.*, 2015b).



**Figura 3.13.** Princípio de operação da TW87 para: (a) faltas internas e (b) faltas externas.

Baseado nisso, é possível definir duas variáveis de restrição:  $i_{RTL}(t)$  e  $i_{RTR}(t)$ . Enquanto que  $i_{RTL}(t)$  representa os casos de faltas externas em que a OV de corrente entra no terminal local e sai pelo terminal remoto da LT; a  $i_{RTR}(t)$  representa os casos de faltas externas em que a OV de corrente entra no terminal remoto e sai no local. Logo, comparando as primeiras ondas incidentes espaçadas do tempo de propagação da LT, obtêm-se os sinais de restrição que crescem para faltas externas e decrescem para faltas internas. Sobretudo, a TW87 utiliza como sinal de restrição,  $i_{RT}(t)$ , o máximo valor entre as duas variáveis (RIBEIRO, 2019):

$$i_{RTL}(t) = |i_{TWL}(t - TWLPT) - i_{TWR}(t)|, \quad (3.33)$$

$$i_{RTR}(t) = |i_{TWR}(t - TWLPT) - i_{TWL}(t)|, \quad (3.34)$$

$$i_{RT}(t) = \max(i_{RTL}(t), i_{RTR}(t)). \quad (3.35)$$

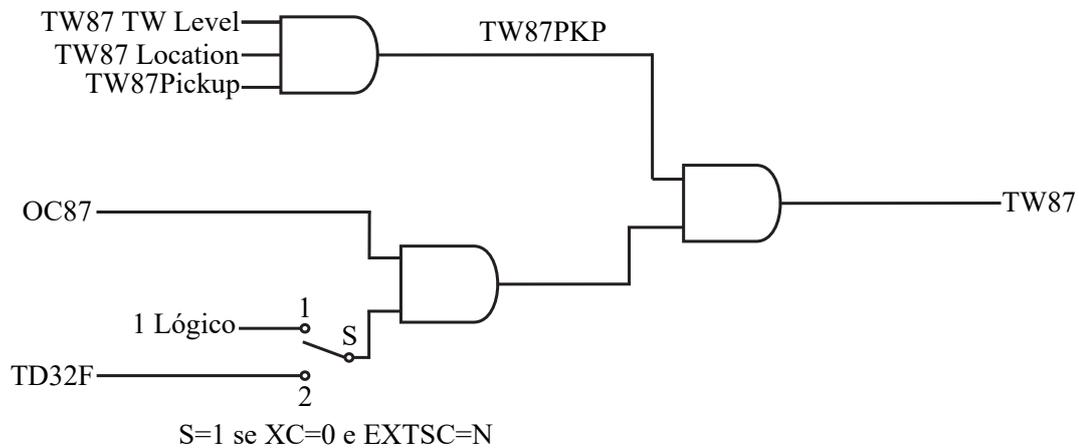
Todavia, nos casos relacionados a faltas internas, é calculado um sinal de operação,  $i_{OP}(t)$ , obtido a partir da soma das primeiras OV's de corrente incidentes no terminal local e remoto da linha, que crescem para faltas internas e decrescem para as externas:

$$i_{OP}(t) = |i_{TWL}(t \pm \Delta T) + i_{TWR}(t)|. \quad (3.36)$$

Portanto, para casos de falta externa,  $i_{RT}(t) > i_{OP}(t)$ . Idealmente,  $i_{OP}(t)$  tende a zero, enquanto que  $i_{RT}(t)$  tende a valores elevados. Por outro lado, para faltas internas,  $i_{RT}(t) < i_{OP}(t)$ , onde as primeiras OV's incidentes nos terminais da LT possuem a mesma polaridade. Assim,  $i_{OP}(t)$  tende a ser maior que  $i_{RT}(t)$ . Dessa maneira, pode-se distinguir os casos de faltas internas e externas utilizando os sinais de operação,  $i_{OP}(t)$  e restrição,  $i_{RT}(t)$ .

### 3.3.4.2 Implementação e Configuração da TW87 no SEL-T400L

A Figura 3.14 apresenta o diagrama lógico simplificado da TW87.



**Figura 3.14.** Diagrama lógico simplificado da TW87 (RIBEIRO, 2019).

Primeiramente, o elemento TW87 precisa satisfazer a condição  $TW87Location$ , que é habilitada quando o distúrbio incidente se encontra na LT e fora das regiões de bloqueio existentes no relé. Essa checagem é realizada por meio de algoritmo de localização de faltas aplicado em tempo real. Além disso, a  $TW87Pickup$  deve ser habilitada quando após obtidas as variáveis de operação e restrição e estimada a tensão de pré-falta no local do defeito, duas condições forem satisfeitas: o módulo da grandeza de operação for maior que a grandeza de restrição aplicada a uma margem de segurança; e a tensão de pré-falta e a grandeza de operação possuírem a mesma

polaridade. Ademais, a *TW87 TW Level*, que é responsável por garantir que a proteção será sensibilizada somente quando da ocorrência de transitórios eletromagnéticos com magnitude relevante, evitando indicações duvidosas, como chaveamentos no sistema, deve ser habilitada também.

Finalmente, após todas as condições de seguranças citadas serem satisfeitas, habilita-se por 1/4 de ciclo a *wordbit TW87PKP*, informando que um potencial curto-circuito ocorre na LT. Adicionalmente, aguarda-se a indicação do elemento de supervisão por sobrecorrente associado à TW87, a OC87, para confirmar a natureza do distúrbio analisado. Ademais, sendo XC o valor da impedância referente à compensação série interna, e EXTSC a confirmação se há compensação série externa à LT, em casos de compensação série em sistemas adjacentes, a TD32 passa a supervisionar a TW87 para garantir segurança na sua atuação. Finalmente, satisfeita todas as condições, habilita-se a *wordbit* que indica a operação da função diferencial TW87 (RIBEIRO, 2017; RIBEIRO, 2019).

Por fim, na Tabela 3.4, são apresentados as configurações necessárias do elemento TW87 para o SEL-T400L.

**Tabela 3.4.** Ajustes da função de proteção TW87.

Ajuste	Definição
ETW87	Habilitador do esquema TW87
TP50P	Supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta bifásicos ( <i>A, secundário</i> ).
TP50G	Supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta monofásicos ( <i>A, secundário</i> ).

### 3.4 RESUMO DOS AJUSTES DO RELÉ SEL-T400L

O relé no domínio do tempo em estudo requer poucas configurações quando analisadas todas as suas aplicações. Todavia, essas configurações acabam sendo críticas para o bom desempenho do relé. Dessa maneira, o SEL-T400L necessita de configurações que podem ser classificadas em duas categorias: dados de identificação do circuito e dados dependentes do sistema elétrico (KASZTENNY *et al.*, 2016).

Os dados de identificação incluem itens conhecidos e não precisam ser calculados, como por exemplo: relação de transformador de corrente (CTR), impedância da LT, frequência nominal

do sistema e outros. Por outro lado, os dados dependentes do sistema elétrico envolvem cálculos e os principais dados foram retratados nesse capítulo. Sendo assim, na Tabela 3.5 é apresentada uma síntese dos principais ajustes das funções de proteção do SEL-T400L.

Ademais, no próximo capítulo, serão apresentadas todas as configurações e seus procedimentos utilizadas no SEL-T400L para sua operação em uma LT real.

**Tabela 3.5.** Ajustes do Relé SEL-T400L.

<b>Função</b>	<b>Ajuste</b>	<b>Definição</b>
TD32	TD32ZF	Impedância do limiar adaptativo para faltas diretas ( $\Omega$ , secundário).
	TD32ZR	Impedância do limiar adaptativo para faltas reversas ( $\Omega$ , secundário).
TD21	TD21MP	Alcance para os <i>loops</i> de falta bifásicos (pu).
	TD21MG	Alcance para os <i>loops</i> de falta monofásicos (pu).
TW87	ETW87	Habilitador do esquema TW87 (Y/N).
	TP50P	Supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta bifásicos ( $A$ , secundário).
	TP50G	Supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta monofásicos ( $A$ , secundário).
POTT	TP67P	Supervisão por sobrecorrente para <i>loops</i> de falta bifásicos ( $A$ , secundário).
	TP67G	Supervisão por sobrecorrente para <i>loops</i> de falta monofásicos ( $A$ , secundário).

## CAPÍTULO 4

# O LIGHTSET

Toda e qualquer função de proteção deve ser parametrizada corretamente para que o seu funcionamento ocorra dentro do esperado. Sendo assim, com a finalidade de possibilitar uma maior facilidade na configuração do relé SEL-T400L, desenvolveu-se um *software* computacional denominado LIGHTSET, cujos detalhes de implementação e metodologia são apresentados neste capítulo. Ademais, destacam-se as funcionalidades do aplicativo e suas potencialidades em relação aos aplicativos reportados na literatura.

### 4.1 VISÃO GERAL

O LIGHTSET funciona de tal forma que o usuário pode carregar diretamente os ajustes necessários, como também, arquivos de simulação do ATP (*Alternative Transient Program*) como forma de auxílio. Na Figura 4.1, ilustra-se a interface gráfica inicial do LIGHTSET.

O princípio de funcionamento do LIGHTSET consiste, primeiramente, nas configurações de identificação do sistema analisado. Essas configurações não demandam cálculos, são constantes e podem ser adquiridas facilmente em arquivos de identificação do sistema. A partir dessas informações, o LIGHTSET consegue obter os ajustes finais da proteção. Entretanto, serão necessários ainda outros dados que demandam um esforço maior. Neste contexto, o LIGHTSET fornece meios que facilitam a obtenção desses dados.

Além disso, o LIGHTSET é composto por aplicações auxiliares que permitem a interação do aplicativo com o relé na obtenção e envio de ajustes. Essas funções auxiliares também permitem que o usuário trabalhe com os ajustes finais obtidos de forma mais prática, oferecendo opções de exportar dados gerados e importar dados salvos no seu banco de dados.

Apresenta-se então, na Figura 4.2, o fluxograma que ilustra o princípio de funcionamento do LIGHTSET.



Figura 4.1. Interface gráfica inicial do LIGHTSET.

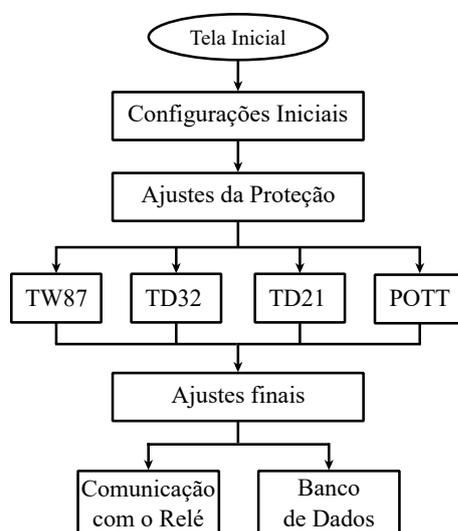


Figura 4.2. Fluxograma do LIGHTSET.

## 4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Inicialmente, serão apresentadas todas as informações obrigatórias e opcionais que o usuário deverá inserir no LIGHTSET para gerar os ajustes finais do SEL-T400L. Dessa maneira, a

aquisição de dados será composta por duas etapas principais: *Configurações Iniciais* e *Ajustes da Proteção*. Sobretudo, a etapa *Ajustes da Proteção* será dividida em quatro etapas intermediárias: *TW87*, *TD32*, *TD21* e *POTT*. A seguir, serão apresentadas todas as informações necessárias para as funcionalidades do LIGHTSET.

### 4.2.1 Configurações Iniciais

Quando o usuário abre a interface do LIGHTSET, ele primeiramente deve identificar o sistema em que o relé está inserido. Na Figura 4.3, apresenta-se a interface da etapa *Configurações Iniciais*. Sendo assim, o usuário deverá informar configurações gerais, configurações das entradas de corrente alternada e configurações da LT.

Tela Inicial   Configurações Iniciais   Ajustes da Proteção

## CONFIGURAÇÕES INICIAIS

**General**

Company Name

Station Identifier

Relay Identifier

Advanced Setting

Y

**Comunicação Relé**

IP

UserName

Password

**AC Input**

CTRW   VNOM

CTRX   NFREQ

50

PTR   PHROT

ABC

LINEI   OPCS

IW   LINEI

mi

Converter valores para secundário

**Line Configuration**

Z1MAG   Z1ANG

Z0MAG   Z0ANG

LL   TWLPT

XC   EXTSC

LLUNIT

mi

**[INFO]**

RELAYTYPE...

FID=SEL-T40...

BFID=SLBT...

PARTNO=T4...

[1]

CONAM	Company Na...
SID	Station Ident...
RID	Relay Identifier
EADVS	Y
NFREQ	60
PHROT	ABC
LINEI	IW
OPCS	LINEI
CTRW	600
CTRX	
PTR	4565.22
VNOM	115

Luma Costa  
Felipe Lopes  
UnB - LAPSE

**Figura 4.3.** Interface gráfica da etapa *Configurações Iniciais*.

Na Tabela 4.1, é apresentada uma síntese das configurações gerais (*General*) que servem para identificar o relé como um ativo da proteção. Recomenda-se seguir a prática de rotulagem da empresa que está inserido o relé. Sobretudo, essas nomeações aparecem no cabeçalho do registro de uma ocorrência, sendo uma forma prática de identificação do local de instalação na hora da ocorrência de um evento. Adicionalmente, compõe também essa etapa o acesso às

configurações avançadas do SEL-T400L, o EADVS (*Advanced Setting*).

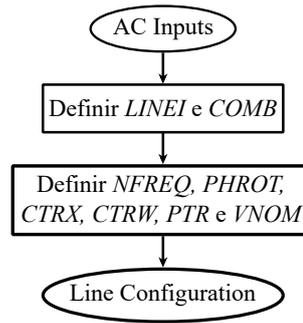
**Tabela 4.1.** Configurações gerais (*General*).

Configuração	Descrição
CONAM ( <i>Company Name</i> )	Nome da empresa.
SID ( <i>Station Identifier</i> )	Identificação do local da instalação.
RID ( <i>Relay Identifier</i> )	Identificação do relé.
EADVS ( <i>Advanced Setting</i> )	Acesso a configurações avançadas. Selecionar ( <i>Y</i> ) para ativar o acesso avançado e ( <i>N</i> ) para desativar.

Ademais, na Tabela 4.2, apresentam-se as configurações das entradas de corrente alternada do sistema. Elas são utilizadas para aplicações da proteção, localização de faltas e registros dos eventos. Para melhor visualização, a Figura 4.4 ilustra um fluxograma do processo de aquisição desses dados.

**Tabela 4.2.** Entradas de corrente (*AC Inputs*).

Configuração	Descrição
CTRW	Configuração que especifica a relação de TC para a corrente secundária conectada na entrada da corrente $W$ do relé.
CTRX	Configuração que especifica a relação de TC para a corrente secundária conectada na entrada da corrente $X$ do relé.
PTR	Configuração que especifica a relação de TP para a tensão secundária conectada na entrada de tensão do relé.
LINEI	Configuração que especifica a corrente de linha para a proteção, localização de faltas e medição. Caso a corrente de linha seja medida na entrada da corrente $W$ do relé, $LINEI = IW$ , caso seja na entrada da corrente $X$ , $LINEI = IX$ . Para aplicações em disjuntor duplo ambas as correntes serão conectadas separadamente nas entradas da corrente $W$ e $X$ , $LINEI = COMB$ .
OPCS	Configuração que especifica a corrente do disjuntor para uso no polo aberto. Quando a corrente do disjuntor é igual a corrente de linha, $OPCS = LINEI$ .
VNOM	Configuração que especifica a tensão secundária nominal do transformador de potencial conectado na entrada de tensão do relé.
NFREQ	Configuração que fornece a frequência nominal do sistema, 50 ou 60 Hz.
PHROT	Configuração que fornece a rotação de fase do sistema, $ABC$ ou $ACB$ .



**Figura 4.4.** Fluxograma dos procedimentos da *AC Inputs*.

O usuário deve primeiramente definir  $LINEI$  e  $COMB$  adequados. Estas informações dependem da configuração do sistema, por exemplo: se for um uma aplicação com um único disjuntor, o TC de proteção deve ser conectado na entrada  $IW$  do relé, quer dizer, define-se a fonte de corrente da linha  $LINEI = IW$  e a fonte de corrente de polo aberto  $OPCS = LINEI$ , conforme é apresentado na Figura 4.5(a). Por outro lado, caso seja uma aplicação de disjuntor duplo, os TCs de proteção devem ser conectados na entrada  $IW$  e  $IX$  do relé, isto é, define-se  $LINEI = COMB$  e  $OPCS = LINEI$ , conforme a Figura 4.5(b). Se for uma aplicação de disjuntor duplo com TCs em paralelo para um único relé, conecta-se os TCs paralelos na entrada  $IW$  do relé e define-se  $LINEI = IW$  e  $OPCS = LINEI$ , conforme a Figura 4.5(c). Caso seja uma aplicação de disjuntor contendo reator na LT, o TC da LT deve ser conectado na entrada  $IW$  e o TC do reator na entrada  $IX$ , ou seja,  $LINEI = COMB$  e  $OPCS = IW$ , conforme a Figura 4.5(d). Por fim, semelhante ao caso da Figura 4.5(c), exceto que a aplicação possui disjuntor duplo com TCs de LT em paralelo, conecta-se os TCs paralelos na entrada  $IW$  do relé e o TC do reator na entrada  $IX$ , quer dizer,  $LINEI = COMB$  e  $OPCS = IW$ , conforme ilustrado na Figura 4.5(e) (SEL, 2019).

Em um próximo passo, o usuário deve inserir a frequência do sistema de potência,  $NFREQ$ , como sendo 60 Hz ou 50 Hz. Além disso, deve escolher a sequência de fase do sistema,  $PHROT$ , entre ABC ou ACB. Finalmente, será necessário inserir a relação do transformador de potencial,  $PTR$ , e a tensão nominal secundária do sistema,  $VNOM$ .

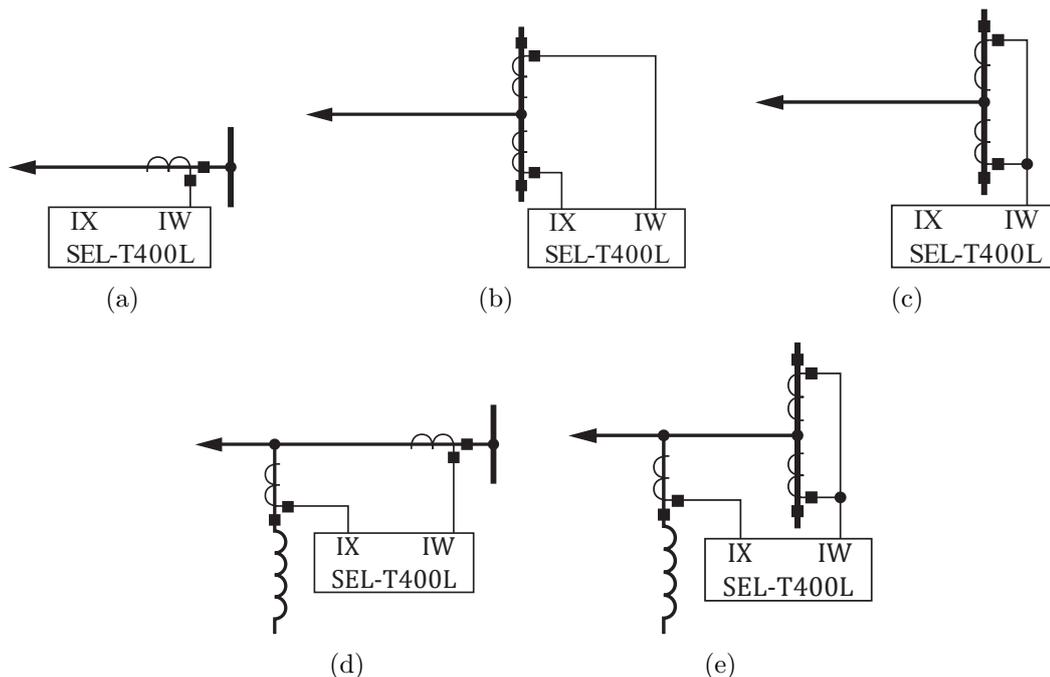


Figura 4.5. Relações dos terminais da LT (SEL, 2019).

Finalizada a etapa *Ac Inputs*, configura-se a LT protegida. O fluxograma da Figura 4.6 apresenta uma síntese dos procedimentos necessários para esta configuração. Além disso, na Tabela 4.3 são apresentadas informações adicionais de cada ajuste para melhor definição.

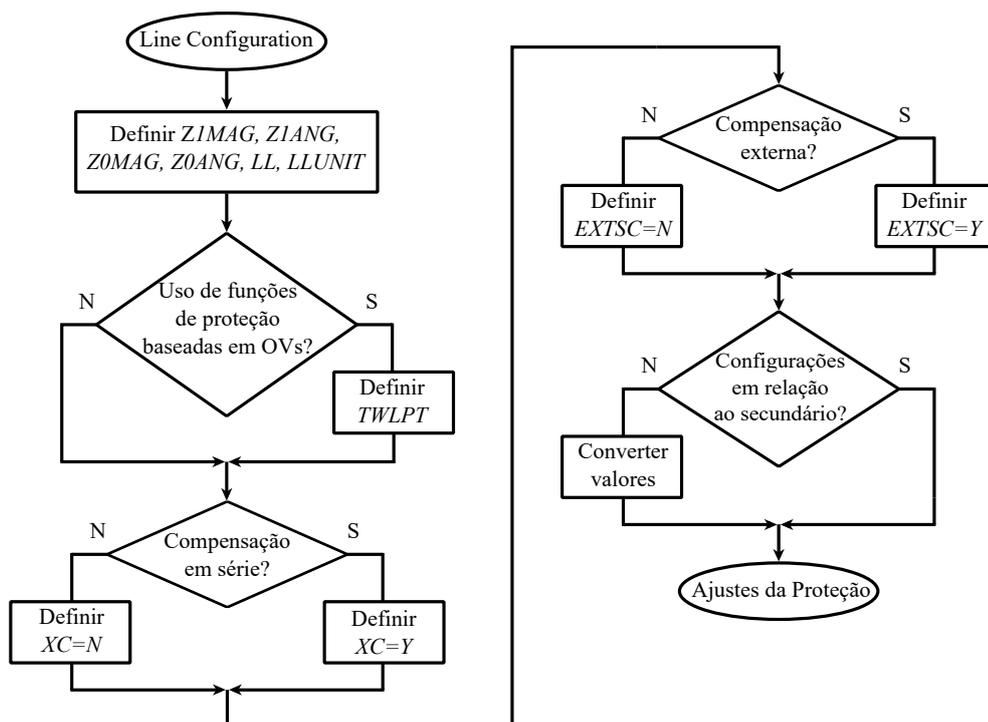


Figura 4.6. Fluxograma dos procedimentos da *Line Configuration*.

**Tabela 4.3.** Configurações da LT (*Line Configuration*).

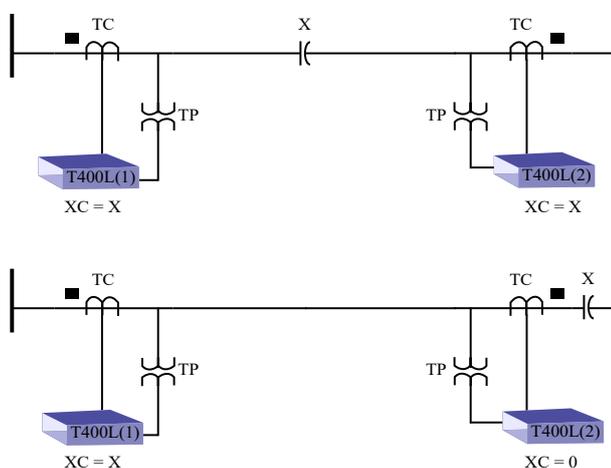
Configuração	Descrição
Z1MAG	Configuração que especifica a magnitude da impedância da LT de sequência positiva em ohms secundários. Ao converter ohms primários em secundários, usa-se a relação do TP e TC com base na configuração LINEI: $CTRW$ se $LINEI = IW$ , $CTRX$ se $LINEI = IX$ , $max(CTRW, CTRX)$ se $LINEI = COMB$ . Orienta-se não incluir nesta configuração a impedância capacitores em série.
Z1ANG	Configuração que especifica a fase da impedância de sequência positiva da LT em graus.
Z0MAG	Configuração que especifica a magnitude da impedância da LT de sequência zero em ohms secundários. Ao converter ohms primários em secundários, usa-se a relação do TP e TC com base na configuração LINEI: $CTRW$ se $LINEI = IW$ , $CTRX$ se $LINEI = IX$ , $max(CTRW, CTRX)$ se $LINEI = COMB$ . Orienta-se não incluir nesta configuração a impedância de capacitores em série.
Z0ANG	Configuração que especifica a fase da impedância de sequência zero da LT em graus.
LLUNIT	Configuração que especifica a unidade de comprimento da LT para milhas ( $LLUNIT = mi$ ) ou quilômetros ( $LLUNIT = km$ ).
LL	Configuração que especifica o comprimento da LT em milhas, se $LLUNIT = mi$ , ou quilômetros, se $LLUNIT = km$ .
TWLPT	Configuração que especifica o tempo de propagação unidirecional em microssegundos para ondas viajantes na LT.
XC	Configuração que especifica a reatância total dos capacitores em série da LT em ohms secundários.
EXTSC	Configuração que especifica ausência(N) ou presença(Y) de capacitores em série próximos à LT.

Primeiramente, o usuário deve inserir as magnitudes das impedâncias de sequência positiva e zero da LT em ohms secundários, Z1MAG e Z0MAG, respectivamente, e inserir também os ângulos da impedância de sequência positiva e zero, Z1ANG e Z0ANG, respectivamente. Além disso, o usuário deve inserir o comprimento da LT, LL, escolhendo devidamente a unidade do comprimento inserido, quer dizer,  $LLUNIT = km$  ou  $LLUNIT = mi$ .

Em seguida, caso se deseje aplicar a proteção diferencial de LT, TW87, ou a localização de falta por OV, será necessário configurar o tempo de propagação da LT, TWLPT, em microssegundos. É importante ressaltar que essa configuração é crítica para a localização de faltas baseada em OV e cada imprecisão desse tempo pode acarretar em erros no processo de

localização de um curto (SEL, 2019).

Adicionalmente, se houver compensação série na LT, deve ser inserida a reatância total dos capacitores em ohms secundários,  $XC$ . Enquanto que, para sistemas sem compensação, aplica-se 0 na configuração  $XC$ . Como forma de exemplificação, na Figura 4.7 é possível entender que a depender da posição dos pontos de medição, o relé pode enxergar ou não a compensação. Em casos em que o banco de capacitores encontra-se instalado entre o TP e o barramento remoto,  $XC$  recebe o valor da reatância; caso contrário,  $XC$  recebe o valor zero. A SEL sugere como opção do cálculo de  $XC$  o produto entre a compensação percentual e a magnitude da impedância de sequência positiva da LT em ohms secundários.



**Figura 4.7.** Procedimento de parametrização da configuração  $XC$  (SEL, 2019).

A configuração  $EXTSC$  é responsável por determinar a ausência ou presença de compensação externa à LT. Sendo assim, com base na Figura 4.8, considera-se uma compensação externa quando um capacitor em série estiver localizado externamente à LT a uma distância do barramento remoto, em que a soma da reatância negativa do capacitor e da reatância positiva da LT entre o barramento remoto e o capacitor, seja negativo. Caso a soma seja positiva, o capacitor não é considerado externo. Assim, se for identificada condição de compensação externa em um terminal da LT, configura-se  $EXTSC = Y$  para o relé que se encontra no terminal oposto (SEL, 2019).

Por fim, como as configurações são referentes ao secundário do sistema, caso os valores inseridos pelo usuário estejam em valores primários, o programa possui a opção *Converter valores para secundário*.

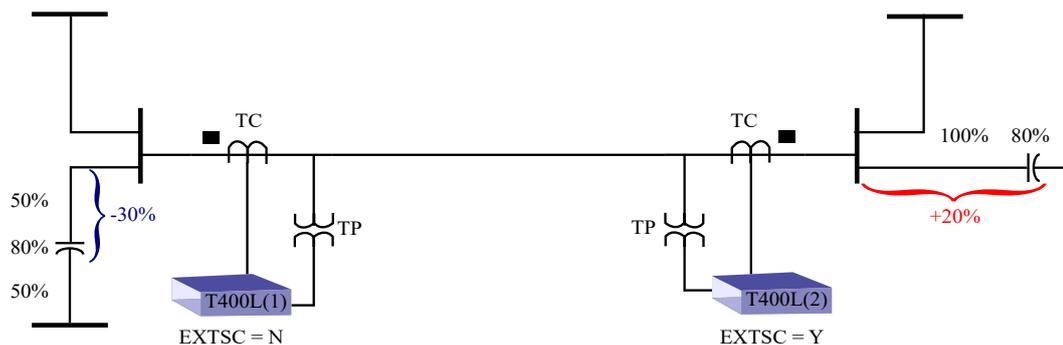


Figura 4.8. Procedimento de parametrização da configuração *EXTSC* (SEL, 2019).

### 4.2.2 Ajustes da Proteção

Após o usuário finalizar a interface das Configurações Iniciais do LIGHTSET, ele deve seguir para a aba de Ajustes da Proteção, conforme é apresentado na Figura 4.9. Nesta etapa, o usuário fornecerá informações adicionais e obterá os ajustes finais das proteções TW87, TD32, TD21 e o esquema POTT.

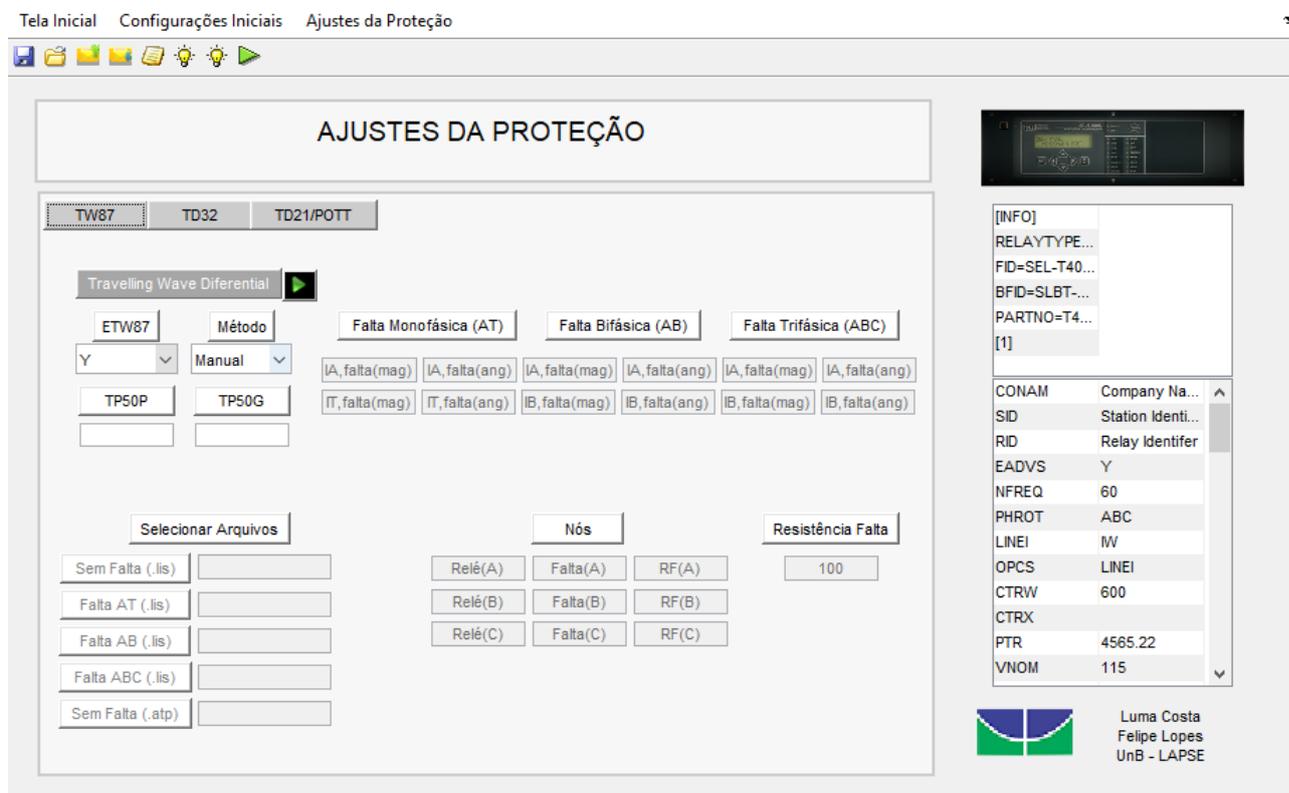
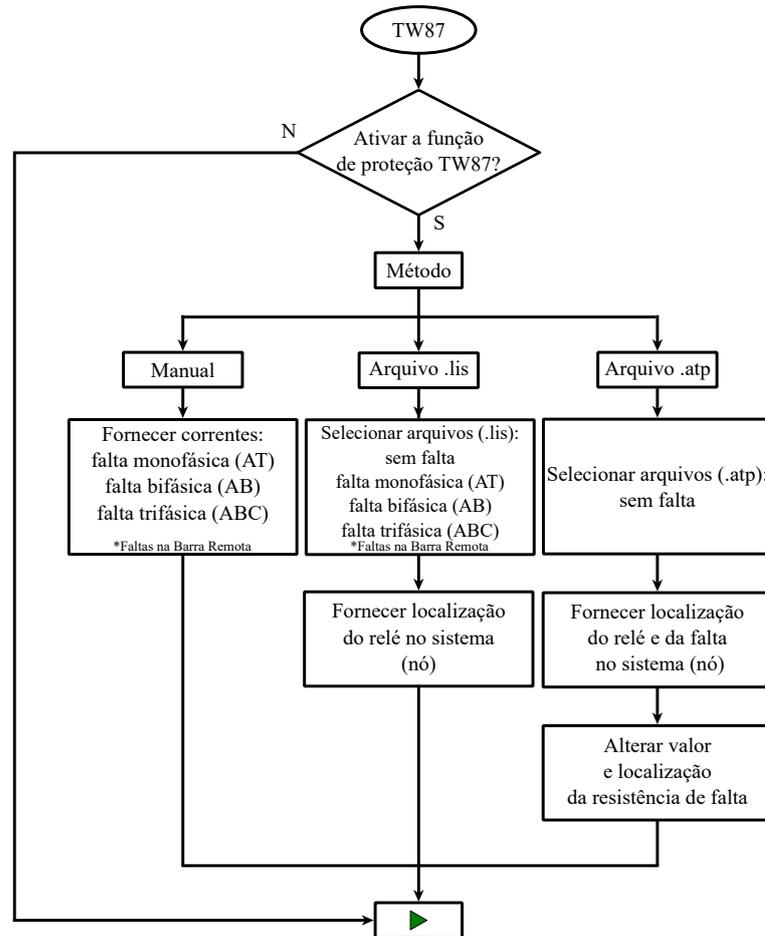


Figura 4.9. Interface gráfica da etapa *Ajustes da Proteção*.

### 4.2.2.1 TP50P e TP50G

A função diferencial de linha baseada na teoria das OV's possui como ajustes o TP50P, que é a supervisão por sobrecorrente para os *loops* de falta bifásicos; o TP50G, que é a supervisão por sobrecorrente para os *loops* de falta monofásicos; e o ETW87, que é a configuração responsável por ativar o esquema de proteção diferencial, conforme foi apresentado na Tabela 3.4. Adicionalmente, a Figura 4.10 ilustra o fluxograma dos procedimentos necessários para a obtenção do TP50G e TP50P no LIGHTSET.



**Figura 4.10.** Fluxograma dos procedimentos da *TW87*.

Partindo do princípio que será habilitada a *TW87*, o usuário deve ativar esta proteção selecionando  $ETW87 = Y$ , caso contrário, ele deve desativá-la selecionando  $ETW87 = N$ . Em seguida, o LIGHTSET fornece três métodos de obtenção de dados de corrente utilizados para o cálculo dos ajustes: *Manual*, *Arquivo .lis* e *Arquivo .atp*. É importante lembrar que no AcSE-Lerator QuickSet, programa de configuração e comunicação dos relés da SEL, o usuário precisa fornecer o TP50G e TP50P, enquanto que no LIGHTSET, o usuário fornece dados de correntes

e o próprio programa de forma automatizada fornece o TP50G e o TP50P, simplificando e facilitando este procedimento.

O método *Manual* solicita ao usuário dados de corrente de falta pura para três tipos de curto-circuito na barra remota: falta monofásica AT, falta bifásica AB e falta trifásica ABC. A Figura 4.11 ilustra a configuração do sistema elétrico para aplicar os curtos. Para a falta monofásica AT, é sugerido ao usuário aplicar uma falta monofásica AT em  $F$  com resistência de falta de  $100 \Omega$ . Para a falta bifásica AB, o usuário precisa aplicar uma falta bifásica AB em  $F$ . Finalmente, no curto ABC, aplica-se uma falta trifásica ABC em  $F$ . Em todos os cenários, o equivalente local deve ser configurado para uma situação de fonte fraca e o equivalente remoto configurado para uma situação de fonte forte. Após aplicado os curtos, insere-se os valores de corrente puro de falta, quer dizer, os valores de correntes incrementais, nos campos correspondentes.

O método *Arquivo .lis* solicita ao usuário quatro arquivos .lis com os seguintes cenários: sem falta, falta monofásica AT, falta bifásica AB e falta trifásica ABC. As configurações destas faltas são as mesmas exemplificadas no método anterior. Além disso, este método solicita ao usuário o nó em que se encontra o relé. Sobretudo, todos os arquivos .lis solicitados pelo programa devem ser aplicados na solução de regime permanente do ATP.

O método *Arquivo .atp* solicita ao usuário um arquivo .atp contendo seu sistema modelado sem falta, os nós que o relé está inserido, os nós onde será aplicada a falta, os nós onde será aplicada a resistência de falta e o valor da resistência de falta. É importante ressaltar que o valor de  $100 \Omega$  da resistência de falta é apenas uma recomendação do programa baseada no fabricante do relé, o usuário consegue alterar esse valor de acordo com a sua preferência. Sobretudo, todos os arquivos .atp solicitados pelo programa devem ser aplicados na solução de regime permanente do ATP.

Por fim, finalizada a escolha do método e o fornecimento dos dados e arquivos, o usuário clicará no botão de calcular e o aplicativo fornecerá o valor do TP50G e do TP50P. Na Figura 4.9 podem ser visualizados todos os campos citados. É importante ressaltar que para estes ajustes, deseja-se conhecer as correntes para situações de menor contribuição de curto-circuito.

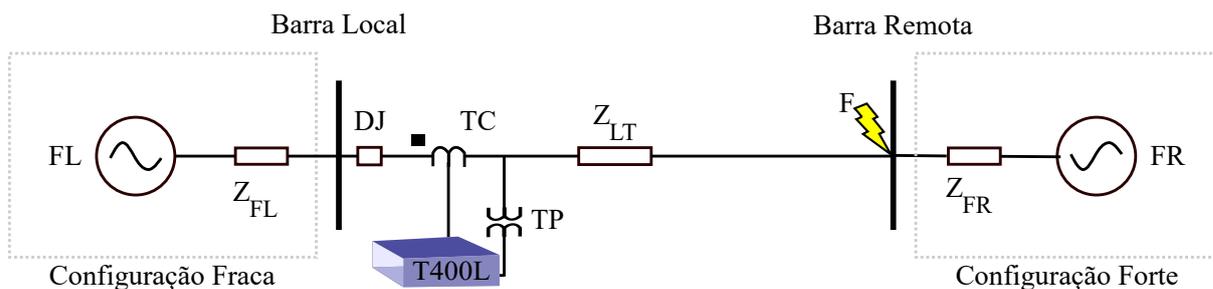


Figura 4.11. Configuração do sistema elétrico para os ajustes de sobrecorrente  $TP50P$  e  $TP50G$ .

#### 4.2.2.2 TD32ZF e TD32ZR

A função direcional de potência aplicada no domínio do tempo possui como ajustes o TD32ZF, que é o limiar de impedância direta, e o TD32ZR, que é o limiar de impedância reversa, conforme foi apresentado na Tabela 3.2. Adicionalmente, a Figura 4.12 ilustra o fluxograma dos procedimentos necessários para a obtenção do TD32ZF e TD32ZR no LIGHTSET.

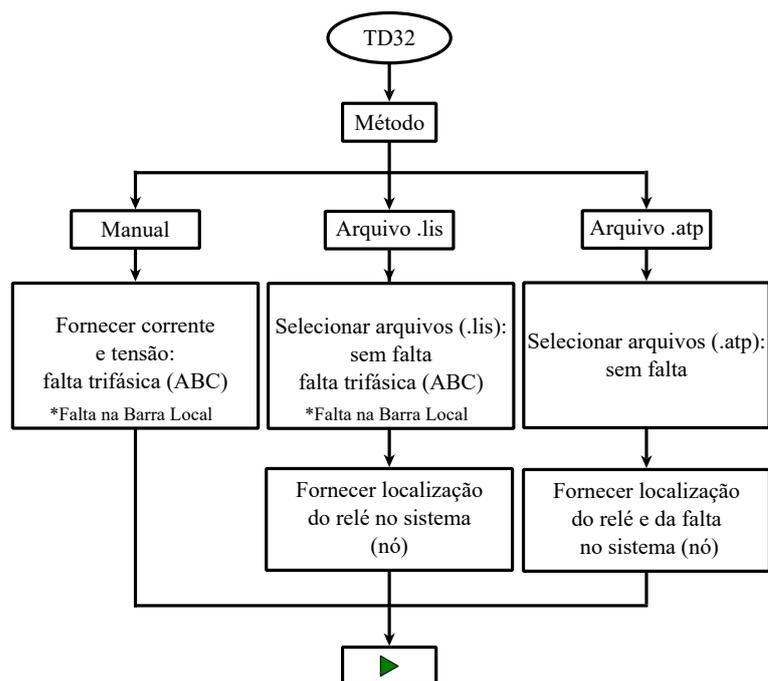


Figura 4.12. Fluxograma dos procedimentos da  $TD32$ .

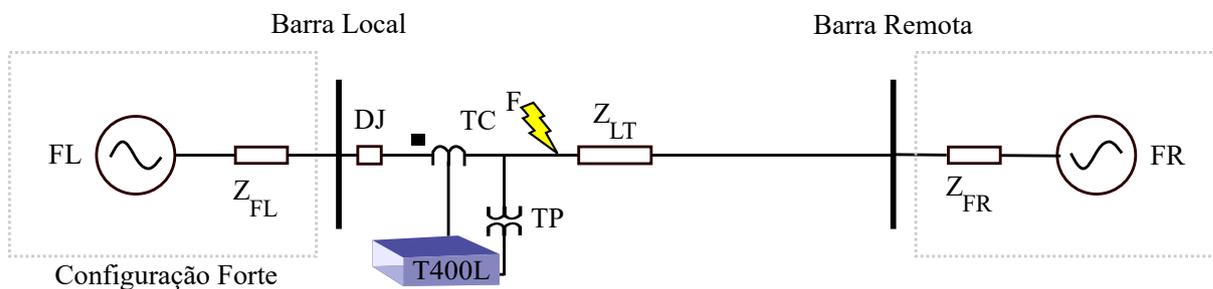
O LIGHTSET fornece três métodos de obtenção de dados de corrente e tensão utilizados para o cálculo dos ajustes da TD32: *Manual*, *Arquivo .lis* e *Arquivo .atp*. É importante lembrar que no AcSELeRator QuickSet o usuário precisa fornecer o TD32ZF e TD32ZR, enquanto que no LIGHTSET o usuário fornece dados de correntes e tensões e o próprio programa de forma automatizada fornece o TD32ZF e TD32ZR, simplificando e facilitando este procedimento.

O método *Manual* solicita ao usuário dados de corrente de falta pura para uma falta trifásica ABC. No curto ABC ilustrado na Figura 4.13, aplica-se uma falta trifásica ABC em  $F$ . O equivalente local deve ser configurado para uma situação de fonte forte. Após aplicado o curto, insere-se os valores de corrente e tensão referentes ao circuito puro de falta nos campos correspondentes.

O método *Arquivo .lis* solicita ao usuário dois arquivos .lis, sendo um com o cenário sem falta e outro com uma falta trifásica ABC aplicada. A falta trifásica segue o mesmo procedimento do método anterior. Além disso, este método solicita ao usuário o nó em que se encontra o relé.

O método *Arquivo .atp* solicita ao usuário um arquivo .atp contendo seu sistema modelado sem falta, os nós que o relé está inserido e os nós onde será aplicada a falta.

Por fim, finalizada a escolha do método e o fornecimento dos dados e arquivos, o usuário clicará no botão de calcular e o aplicativo fornecerá o valor do TD32ZF e TD32ZR. Na Figura 4.14 podem ser observados todos os campos retratados. É importante ressaltar que para estes ajustes, deseja-se obter a impedância do equivalente de Thévenin atrás da barra monitorada.



**Figura 4.13.** Configuração dos limiares de impedância  $TD32ZF$  e  $TD32ZR$ .

### 4.2.2.3 TD21MP e TD21MG

A função de distância aplicada no domínio do tempo possui como ajustes o TD21MP, que é o alcance para os *loops* de falta bifásicos, e o TD21MG, que é o alcance para os *loops* de falta monofásicos, conforme foi apresentado na Tabela 3.3.

Nesta função, o método *Recomendável* consiste em fornecer um valor recomendado pela SEL. Para o TD21MP é de  $0,75 pu$  e para o TD21MG é  $0,70 pu$ . Entretanto, o programa disponibiliza a alteração do campo do ajuste de acordo com a preferência do usuário. Sendo assim, finalizada a escolha do valor recomendável ou a inserção do valor de preferência, a função



Figura 4.14. Interface gráfica da etapa TD32..

estará configurada. Na Figura 4.15 podem ser observados todos os campos citados.

#### 4.2.2.4 TP67P e TP67G

A supervisão por sobrecorrente utilizada no esquema POTT das funções do relé SEL-T400L possui como ajustes o TP67P, que é a supervisão por sobrecorrente para os *loops* de falta bifásicos, e o TP67G, que é a supervisão por sobrecorrente para os *loops* de falta monofásicos, conforme é apresentado na Tabela 4.4. Adicionalmente, a Figura 4.16 ilustra o fluxograma dos procedimentos necessários para a obtenção do TP67P e TP67G no LIGHTSET.

Tabela 4.4. Configurações do esquema POTT.

Configuração	Descrição
TP67P	Supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta bifásicos ( <i>A, secundário</i> ).
TP67G	Supervisão por sobrecorrente para os <i>loops</i> de falta monofásicos ( <i>A, secundário</i> ).

O LIGHTSET fornece quatro métodos de obtenção de dados de corrente e impedância uti-



**Figura 4.15.** Interface gráfica da etapa *TD21/POTT*.

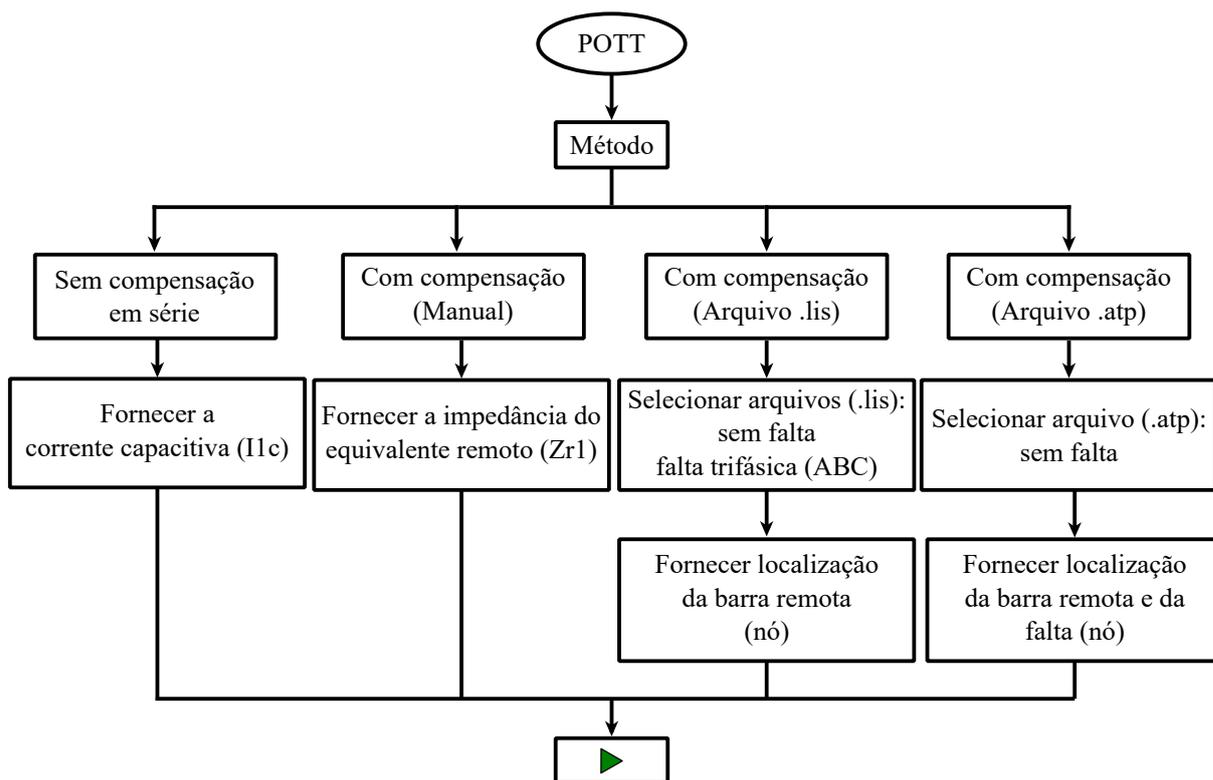
lizados no cálculo dos ajustes do esquema POTT: *Sem compensação série*, *Com compensação (Manual)*, *Com compensação (Arquivo .lis)* e *Com compensação (Arquivo .atp)*. É importante lembrar que no AcSELeRator QuickSet o usuário precisa fornecer o TP67P e o TP67G, enquanto que no LIGHTSET, o usuário fornece dados de correntes e impedância e o próprio programa de forma automatizada fornece o TP67P e TP67G, simplificando e facilitando este procedimento.

O método *Sem compensação série* solicita ao usuário apenas a corrente capacitiva da LT.

O método *Com compensação (Manual)* solicita ao usuário a corrente capacitiva da LT e a impedância do equivalente remoto do sistema. Esta impedância pode ser obtida aplicando uma falta trifásica ABC em  $F$  e considerando fonte forte atrás da barra remota, conforme ilustrado na Figura 4.11.

O método *Com compensação (Arquivo .lis)* solicita ao usuário dois arquivos .lis, sendo um com o cenário sem falta e outro com uma falta trifásica ABC aplicada. A falta trifásica segue o mesmo procedimento do método anterior. Além disso, este método solicita ao usuário o nó em que se encontra a barra remota.

O método *Com compensação (Arquivo .atp)* solicita ao usuário um arquivo .atp contendo o



**Figura 4.16.** Fluxograma dos procedimentos do esquema POTT.

sistema modelado sem falta, os nós da barra remota e os nós onde será aplicado o curto.

Por fim, finalizada a escolha do método e o fornecimento dos dados e arquivos, o usuário clicará no botão de calcular e o aplicativo fornecerá o valor do TP67P e TP67G. Na Figura 4.15 podem ser observados todos os campos citados.

### 4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após o usuário inserir os dados necessários e requisitar os cálculos dos ajustes, o algoritmo implementado passa por uma etapa de processamento dos dados. A seguir, apresenta-se o processamento para cada função de proteção. Ademais, será detalhada como é feita a comunicação com o relé. Por fim, é importante ressaltar que os procedimentos utilizados no LIGHTSET foram baseados na versão 2019 do Manual do Relé SEL-T400L.

### 4.3.1 Funções de Proteção

#### 4.3.1.1 TW87

A etapa de processamento dos dados no LIGHTSET para a função diferencial TW87 consiste em calcular os parâmetros TP50G e TP50P. Conforme foi apresentado no capítulo anterior, esses parâmetros são da supervisão por sobrecorrente não-direcional. Logo, espera-se que os valores de correntes desses parâmetros, validem a natureza do distúrbio, isto é, eles precisam ser valores críticos para a identificação de um real curto-circuito, diferenciando de outros eventos como chaveamento na LT.

A princípio, o aplicativo utiliza a escolha do método do usuário para obter os valores incrementais das correntes dos curtos-circuitos. Isto é, o método *Manual* utiliza os valores inseridos nos campos correspondentes diretamente, sem nenhum passo adicional. Já o método *Arquivo .lis* realiza a leitura dos valores das correntes em regime permanente dos quatro arquivos .lis. Assim, o programa é capaz de utilizar os valores em regime permanente de cada um dos três curtos e subtraí-los dos valores em regime permanente do arquivo .lis sem falta. Dessa forma, obtêm-se os valores incrementais. Por outro lado, o método *Arquivo .atp* aplica as três faltas necessárias utilizando o arquivo .atp fornecido pelo usuário. Após a simulação, o programa repete o processo de leitura dos valores em regime permanente até chegar nos valores incrementais para cada curto circuito.

Finalizada a obtenção dos valores incrementais das correntes, para a TP50G, o LIGHTSET utiliza os valores de corrente incremental do curto monofásico AT e calcula a magnitude da corrente réplica incremental para o *loop* de falta monofásico AT:

$$|\Delta I_{AT}| = \left| \Delta I_A + \frac{1}{3} \cdot \Delta I_T \cdot \left( \frac{Z_{LT0}}{Z_{LT1}} - 1 \right) \right|, \quad (4.1)$$

em que  $Z_{LT1}$  corresponde às configurações Z1MAG e Z1ANG, e  $Z_{LT0}$  corresponde aos valores de Z0MAG e Z0ANG.

O programa então converte a corrente réplica incremental calculada para valores secundários de corrente e obtém a partir dela o ajuste TP50G, aplicando um fator de segurança de 50%:

$$TP50G = 0,5 \cdot \frac{|\Delta I_{AT}|}{CTR}. \quad (4.2)$$

Para o cálculo da TP50P, a partir dos valores incrementais de corrente dos curtos bifásico

AB e trifásico ABC, é calculada a corrente réplica incremental para os *loops* de falta bifásicos AB:

$$|\Delta I_{AB,2\phi}| = |\Delta I_{A,2\phi} - \Delta I_{B,2\phi}|, \quad (4.3)$$

$$|\Delta I_{AB,3\phi}| = |\Delta I_{A,3\phi} - \Delta I_{B,3\phi}|. \quad (4.4)$$

O programa então converte a corrente réplica incremental calculada dos dois curtos para valores secundários de corrente e obtém a partir delas o ajuste TP50P, aplicando um fator de segurança de 50% e escolhendo o valor mínimo entre elas:

$$TP50P = 0,5 \cdot \min \left( \frac{|\Delta I_{AB,2\phi}|}{CTR}, \frac{|\Delta I_{AB,3\phi}|}{CTR} \right). \quad (4.5)$$

Em casos com compensação série, diferente do esquema de teleproteção POTT, o esquema TW87 permanece seguro para esses cenários. Isto ocorre porque a TW87 ignora a tensão sobre sobre banco de capacitores e enxerga este evento como externo à proteção (KASZTENNY *et al.*, 2016).

#### 4.3.1.2 TD32

Conforme foi visto no capítulo anterior, o elemento TD32 compara um torque operacional com um torque de restrição para faltas diretas e reversas. Essa comparação no domínio do tempo é fundamentada pelas configurações TD32ZF, limiar de impedância para faltas diretas e, TD32ZR, limiar de impedância para faltas reversas. Caso o sistema não seja homogêneo, erros poderão surgir durante a análise de um defeito, sendo estes reduzidos com uma confiável configuração dos limiares TD32ZF e TD32ZR (KASZTENNY *et al.*, 2016).

A princípio, a partir da escolha do método do usuário, o aplicativo obtém os valores incrementais da corrente e tensão do curto-circuito ABC. Isto é, o método *Manual* utiliza os valores inseridos nos campos correspondentes diretamente, sem nenhum passo adicional. Já o método *Arquivo .lis* realiza a leitura dos valores das correntes em regime permanente dos dois arquivos .lis. Assim, o programa é capaz de utilizar os valores em regime permanente da falta e subtraí-los dos valores em regime permanente do arquivo .lis sem falta. Dessa forma, obtêm-se os valores incrementais. Por outro lado, o método *Arquivo .atp* aplica a falta necessária utilizando o arquivo .atp fornecido pelo usuário. Após a simulação, o programa repete o processo

de leitura dos valores em regime permanente até chegar nos valores incrementais para o curto trifásico.

A TD32ZF deve ser definida como uma fração da impedância de sequência positiva do equivalente local. Matematicamente, essa impedância é calculada a partir dos valores incrementais obtidos, sendo assim:

$$|Z_{L1}| = \left| \frac{\Delta V_A}{\Delta I_A} \right|, \quad (4.6)$$

$$|Z_{L1,sec}| = |Z_{L1}| \cdot \frac{CTR}{PTR} \quad (4.7)$$

Em virtude de cobrir os piores casos, é recomendável aplicar um fator de confiabilidade de 0,3 para contabilizar a não homogeneidade entre as impedâncias da LT e do sistema circunvizinho. Dessa forma, o LIGHTSET, após ter acesso aos valores incrementais de corrente e tensão, calcula o limiar de impedância para faltas diretas da seguinte forma:

$$TD32ZF = 0,3 \cdot |Z_{L1,sec}|. \quad (4.8)$$

A TD32ZR corresponde a uma fração da impedância de sequência positiva da LT, a qual é obtida a partir de Z1MAG e Z1ANG . Da mesma forma, desejando-se cobrir os piores casos, é recomendável aplicar um fator de confiabilidade de 0,3 para contabilizar a não homogeneidade entre as impedâncias da LT e do sistema circunvizinho:

$$TD32ZR = 0,3 \cdot |Z_{LT1,sec}|. \quad (4.9)$$

Em cenários com compensação série na LT, isto é, com o ajuste  $XC$  da etapa *Configurações Iniciais* diferente de um valor nulo, o capacitor afeta a configuração da TD32ZR. Nesse caso,  $Z_{LT1}$  deve incluir a impedância da reatância total do capacitor, resultando na seguinte forma:

$$TD32ZR = 0,3 \cdot |Z_{LT1,sec} + (-jXC_{sec})|. \quad (4.10)$$

#### 4.3.1.3 TD21

A proteção TD21 é composta por dois ajustes: TD21MP, alcance do elemento de distância de fase e, TD21MG, alcance do elemento de distância de terra. Esses parâmetros de alcance devem cobrir a maior parte da LT protegida, mas devem ficar abaixo do barramento remoto

com uma margem de segurança. Essa margem é importante para garantir confiabilidade à função perante a situação de erros dos TCs e TPs, dos dados de impedância da LT e dos erros de ultrapassagem da própria função TD21 (KASZTENNY *et al.*, 2016).

Levando em conta os fatores citados, recomenda-se a parametrização do alcance do elemento de fase  $0,75 pu$  e, sabendo que os dados de impedância de sequência zero são geralmente menos precisos que os dados de impedância de sequência positiva, recomenda-se a configuração do alcance do elemento do terra em  $0,70 pu$ , quer dizer, aplica-se uma margem de segurança maior. Além disso, em cenários que o sistema possua compensação série, essa função de proteção de distância não requer ajustes adicionais.

#### 4.3.1.4 POTT

O esquema de teleproteção POTT é implementado utilizando os elementos direcionais TD32 e TW32. Este esquema usa a supervisão por sobrecorrente para discernir faltas entre os eventos de baixo teor energético que acontecem na rede. Visto isso, a supervisão é parametrizada configurando o TP67P, supervisão para os *loops* bifásicos e, TP67G, supervisão para os *loops* monofásicos.

Sendo assim, para cenários sem compensação série, é possível obter essa parametrização da seguinte forma:

$$TP67G = \max(TP50G; (1, 3) \cdot I_{1C,sec}), \quad (4.11)$$

$$TP67P = \max(TP50P; (1, 3) \cdot \sqrt{3} \cdot I_{1C,sec}). \quad (4.12)$$

Por outro lado, em casos com compensação, é necessário calcular a impedância de sequência positiva do equivalente remoto,  $Z_{R1}$ . Para este cálculo o aplicativo utiliza o método escolhido pelo usuário. Caso o usuário escolha o método *Com compensação manual*, a impedância é retirada diretamente do campo correspondente; caso seja o método *Com compensação Arquivo .lis*, o programa obterá os valores incrementais de tensão e corrente a partir dos valores em regime permanente deste arquivo; por último, caso seja o método *Com compensação Arquivo .atp*, o programa irá aplicar o curto trifásico ABC no arquivo .atp, para então, realizar o mesmo procedimento do método anterior.

Dessa forma, a impedância do equivalente remoto pode ser representada matematicamente

como:

$$|Z_{R1}| = \left| \frac{\Delta V_A}{\Delta I_A} \right|, \quad (4.13)$$

$$|Z_{R1,sec}| = |Z_{R1}| \cdot \frac{CTR}{PTR} \quad (4.14)$$

Visto isso, apresenta-se agora a parametrização do LIGHTSET para esta supervisão por sobrecorrente:

$$TP67G = \frac{1,25}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{NOM,sec}}{|Z_{L1,sec} + Z_{LT1,sec} + Z_{R1,sec}|}, \quad (4.15)$$

$$TP67P = \sqrt{3} \cdot TP67G. \quad (4.16)$$

### 4.3.2 Comunicação com o Relé

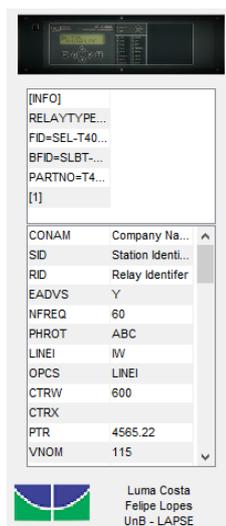
A comunicação do LIGHTSET com o relé é feita por um protocolo de transferência de arquivos, FTP (*File Transfer Protocol*). Para existir a conexão com o relé, o usuário deve informar o nome de utilizador (*UserName*), uma senha de acesso (*Password*) e o endereço de *IP* ao qual o relé está conectado. Na Figura 4.17 é possível observar a interface gráfica da comunicação.

A interface gráfica da comunicação com o relé é apresentada em um formulário com o título "Comunicação Relé". Abaixo do título, há três campos de entrada de texto, cada um com um rótulo: "IP", "UserName" e "Password".

**Figura 4.17.** Interface gráfica da comunicação com o relé.

O envio e leitura dos ajustes feita via comunicação acontece por meio de um arquivo .txt. Este arquivo contém todas as configurações do relé voltadas para a proteção. A Figura 4.18 ilustra a tabela contendo todas as configurações. É importante ressaltar que os ajustes não cobertos pelo aplicativo, podem ser alterados diretamente na tabela antes do envio para o relé e também são lidos na hora da leitura do relé.

Por fim, foram adicionadas ferramentas auxiliares ao programa para facilitar a manipulação das informações geradas. A Tabela 4.5 mostra a definição de cada ferramenta, elas podem ser graficamente observadas na Figura 4.19.



**Figura 4.18.** Interface gráfica da tabela de configurações do relé.



**Figura 4.19.** Interface gráfica das ferramentas auxiliares.

**Tabela 4.5.** Ferramentas auxiliares.

Ferramenta	Descrição
Salvar Como	Salva um arquivo .txt contendo os dados apresentados na tabela de configurações.
Abrir Ajuste	Abre um arquivo .txt e carregar os seus dados na tabela de configurações.
Enviar para o Relé	Envia um arquivo .txt contendo os dados apresentados na tabela de configurações.
Leitura do Relé	Lê um arquivo .txt do relé e carregar os seus dados na tabela de configurações.
Visualizar Ajustes Atuais	Atualiza a tabela de configurações.
Exemplo sem compensação série	Carrega os dados de um exemplo sem compensação fornecido pelo Manual do Relé SEL-T400L(2019).
Exemplo com compensação série	Carrega os dados de um exemplo com compensação fornecido pelo Manual do Relé SEL-T400L(2019).
Processar	Processa todas as informações fornecidas pelo o usuário para obter os ajustes.

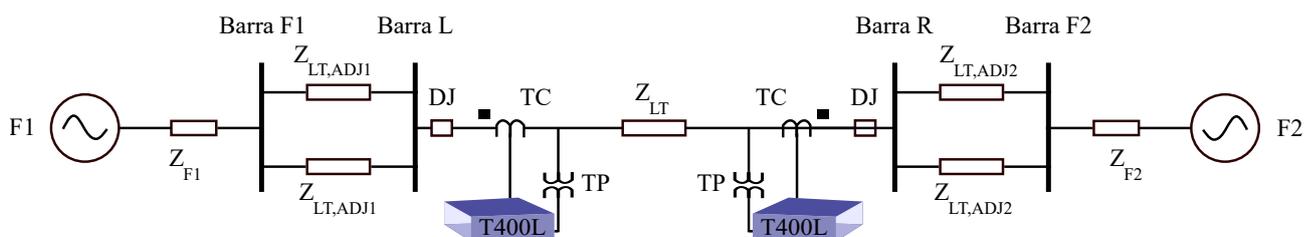
## AVALIAÇÃO DO LIGHTSET

Este capítulo apresenta estudos de casos envolvendo dois sistemas de potência com o objetivo de validar o funcionamento do LIGHTSET. Inicialmente, apresenta-se uma descrição dos sistemas de potência utilizados durante os testes: um Sistema Simples e um Sistema Complexo. No caso do Sistema Simples, serão detalhados os cálculos dos ajustes do SEL-T400L de forma manual, como é feito atualmente pelo *AcSELerator QuickSet*, e de forma automatizada, com o auxílio do LIGHTSET. Para o Sistema Complexo, será relatado apenas o método do LIGHTSET. Além disso, para o Sistema Simples serão descritos apenas os procedimentos para o relé conectado no terminal local da LT, já que o procedimento é o mesmo para o relé do terminal remoto. Por fim, serão descritos os testes realizados e apresentados os resultados obtidos.

### 5.1 PARAMETRIZAÇÃO DO SEL-T400L EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

#### 5.1.1 Sistema Simples

A figura 5.1 ilustra um sistema elétrico de potência modelado e simulado em ATP, com LTs idealmente transpostas e modeladas a parâmetros distribuídos e constantes na frequência, que será utilizado para avaliar as vantagens do uso do LIGHTSET no processo de parametrização dos ajustes do relé SEL-T400L.



**Figura 5.1.** Configuração do Sistema Simples no ATP.

O sistema simples opera em 500 kV/60 Hz e possui cinco LTs modeladas. A LT protegida e

as LTs adjacentes possuem, respectivamente, 200 km e 15 km. Na Tabela 5.1 é possível observar os dados do sistema.

**Tabela 5.1.** Dados do Sistema Simples.

Dado	Valor
$Z_{LT1,sec}$	$5,65/83,53^\circ \Omega, sec$
$Z_{LT0,sec}$	$29,07/74,67^\circ \Omega, sec$
RTC	400
RTP	4347,83

### 5.1.1.1 Método Manual

A exemplo de comparação, será apresentado a seguir a parametrização dos ajustes das funções de proteção do SEL-T400L de forma manual, sem a utilização do LIGHTSET.

Na função TW87, o *Quickset* solicita ao usuário os valores do TP50P e TP50G diretamente, sendo necessário calcular externamente ao programa. Dessa forma, com base no capítulo anterior, aplicou-se as faltas monofásica AT, bifásica AB e trifásica ABC para esses ajustes. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.2.

A partir dos valores incrementais de corrente, para o TP50G, calculou-se a magnitude da corrente réplica incremental para o *loop* de falta monofásico AT, expressão apresentada na equação (4.1). Posteriormente, essa corrente réplica calculada foi convertida para valores secundários e foi aplicado um fator de segurança, conforme retratado na equação (4.2).

Por outro lado, para o TP50P, utilizou-se os valores incrementais de corrente para calcular os *loops* de falta bifásicos para o curto bifásico e trifásico. Assim como o TP50G, este ajuste teve que ser convertido para valores secundários e foi aplicado um fator de segurança, adicionalmente, compararam-se os valores encontrados para os dois *loops* de falta bifásicos e escolheu-se o menor entre eles. Esse processo consistiu nas equações (4.3), (4.4) e (4.5), os resultados encontrados estão relatados na Tabela 5.4.

Para a função TD32, utilizando o *Quickset* o usuário também necessita de cálculos externos ao programa, os ajustes necessários são o TD32ZF e o TD32ZR. Sendo assim, com o intuito de obter o ajuste TD32ZF, aplicou-se um curto trifásico ABC para obter a impedância de

sequência positiva do equivalente local, em que os valores observados foram apresentados na Tabela 5.3. Em seguida, essa impedância foi convertida para valores secundários e aplicou-se um fator de confiabilidade. Sobretudo, como não há compensação série neste caso simulado, foi possível obter o TD32ZR a partir da impedância de sequência positiva da LT com a aplicação de um fator de confiabilidade. Na Tabela 5.4 foram apresentados os resultados obtidos e as equações utilizadas foram: (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10).

Por fim, para os ajustes da TD21 e da supervisão por sobrecorrente do esquema POTT não foram necessários cálculos externos. Os ajustes TD21MG e TD21MP consistem em valores recomendáveis fixos e os ajustes TP67P e TP67G, por não haver compensação série, correspondem aos mesmos valores da TP50P e TP50G. Os resultados encontrados estão relatados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.2.** Valores dos sinais de correntes de pré-falta, falta e incremental para os ajustes TP50P e TP50G.

Sinal	Valor
$I_{A,PF}$	491,01 / $-7,64^\circ$ A
$I_{B,PF}$	491,01 / $-127,64^\circ$ A
$I_{C,PF}$	491,01 / $112,36^\circ$ A
$I_{A,1\phi}$	541,07 / $-10,10^\circ$ A
$I_{B,1\phi}$	490,88 / $-127,68^\circ$ A
$I_{C,1\phi}$	491,39 / $112,37^\circ$ A
$I_{A,2\phi}$	1061,35 / $-82,24^\circ$ A
$I_{B,2\phi}$	1061,35 / $157,76^\circ$ A
$I_{C,2\phi}$	1061,35 / $37,76^\circ$ A
$I_{A,3\phi}$	1061,35 / $-82,24^\circ$ A
$I_{B,3\phi}$	1061,35 / $157,76^\circ$ A
$I_{C,3\phi}$	1061,35 / $37,76^\circ$ A
$\Delta I_{A,1\phi}$	54,73 / $-32,74^\circ$ A
$\Delta I_{B,1\phi}$	0,36 / $121,56^\circ$ A
$\Delta I_{C,1\phi}$	0,39 / $125,08^\circ$ A
$\Delta I_{T,1\phi}$	54,05 / $-32,42^\circ$ A
$\Delta I_{A,2\phi}$	933,83 / $-87,34^\circ$ A
$\Delta I_{B,2\phi}$	894,35 / $109,32^\circ$ A
$\Delta I_{C,2\phi}$	1,92 / $-5,01^\circ$ A
$\Delta I_{A,3\phi}$	1044,38 / $-109,19^\circ$ A
$\Delta I_{B,3\phi}$	1044,38 / $130,80^\circ$ A
$\Delta I_{C,3\phi}$	1044,38 / $10,81^\circ$ A

**Tabela 5.3.** Valores dos sinais de correntes e tensões de pré-falta, falta e incremental para os ajustes TD32ZF e TD32ZR.

Sinal	Valor
$V_{A,PF}$	411862, 88/0, 79° V
$V_{B,PF}$	411862, 88/-119, 20° V
$V_{C,PF}$	411862, 88/120, 79° V
$I_{A,PF}$	659, 74/40, 07° A
$I_{B,PF}$	659, 74/-79, 92° A
$I_{C,PF}$	659, 74/160, 07° A
$V_{A,3\phi}$	3, 26/-69, 01° V
$V_{B,3\phi}$	3, 26/170, 98° V
$V_{C,3\phi}$	3, 26/50, 98° V
$I_{A,3\phi}$	74209, 68/-82, 20° A
$I_{B,3\phi}$	74209, 68/157, 79° A
$I_{C,3\phi}$	74209, 68/37, 79° A
$\Delta V_{A,3\phi}$	411861, 75/-179, 20° V
$\Delta V_{B,3\phi}$	411861, 75/60, 80° V
$\Delta V_{C,3\phi}$	411861, 75/-59, 20° V
$\Delta I_{A,3\phi}$	74564, 00/-82, 62° A
$\Delta I_{B,3\phi}$	74564, 00/157, 36° A
$\Delta I_{C,3\phi}$	74564, 00/37, 36° A

**Tabela 5.4.** Variáveis finais e parciais dos ajustes.

Variável	Resultado
$ \Delta I_{AT,1\phi} $	129,13 A, sec
$TP50G$	0,16 A, sec
$ \Delta I_{AB,2\phi} $	1808,90 A, sec
$ \Delta I_{AB,3\phi} $	1809,01 A, sec
$TP50P$	2,26 A, sec
$ \Delta Z_{L1} $	5,52 $\Omega$ , sec
$TD32ZF$	0,15 $\Omega$ , sec
$TD32ZR$	1,69 $\Omega$ , sec
$TD21MG$	0,70 pu, sec
$TD21MP$	0,75 pu, sec
$TP67G$	0,16 A, sec
$TP67P$	2,26 A, sec

### 5.1.1.2 Método LIGHTSET

Por meio do mesmo Sistema Simples foi possível obter os ajustes do SEL-T400L utilizando como auxílio a plataforma LIGHTSET. Dessa maneira, primeiro foi necessário configurar a aba

*Configurações Iniciais*, como pode ser observado na Figura 5.2.

Em seguida, na aba *Ajustes da Proteção* e opção *TW87*, escolheu-se o método *Arquivo .atp*. Conforme explicado, por meio deste método o usuário precisa fornecer apenas o arquivo .atp do seu sistema e indicar os pontos onde se encontram o relé e a barra remota, onde será aplicada a falta. Visto isso, o programa calcula automaticamente os ajustes TP50G e TP50P, conforme apresentado na Figura 5.3.

Na mesma aba, mas agora na opção *TD32*, também optou-se pelo método *Arquivo .atp*, sendo necessário fornecer a localização do relé e da barra local, onde será aplicada a falta. A partir disso, a plataforma calcula automaticamente os ajustes TD32ZF e TD32ZR. Na Figura 5.4 essa parametrização pode ser observada.

Finalmente, na opção *TD21/POTT* foi escolhido para a TD21 o método *Recomendável*, que já fornece os valores recomendáveis pelo fabricante. Além disso, para o POTT, foi utilizado o método *Sem compensação série*. Na Figura 5.5 esses ajustes podem ser observados.

The image shows a software configuration interface for the SEL-T400L system. It is divided into three main sections: General, AC Input, and Line Configuration. The General section includes fields for PLAB, RELE DE CIMA, DCAL BASE T400L, and an Advanced Setting dropdown set to 'Y'. The AC Input section contains fields for CTRW (400), VNOM (115), CTRX (1), NFREQ (60), PTR (4347.83), PHROT (ABC), LINEI (K), and OPCS (LINEI). The Line Configuration section includes Z1MAG (5.65), Z1ANG (83.53), Z0MAG (29.07), Z0ANG (74.67), LL (200), TWLPT (680.27), XC (0.00), EXTSC (N), and LLUNIT (km). A button at the bottom right reads 'Converter valores para secundário'.

Section	Parameter	Value
General	PLAB	
	RELE DE CIMA	
	DCAL BASE T400L	
	Advanced Setting	Y
AC Input	CTRW	400
	VNOM	115
	CTRX	1
	NFREQ	60
	PTR	4347.83
	PHROT	ABC
	LINEI	K
	OPCS	LINEI
Line Configuration	Z1MAG	5.65
	Z1ANG	83.53
	Z0MAG	29.07
	Z0ANG	74.67
	LL	200
	TWLPT	680.27
	XC	0.00
	EXTSC	N
LLUNIT	km	

**Figura 5.2.** Configurações Iniciais para o Sistema Simples.

### AJUSTES DA PROTEÇÃO

TW87
TD32
TD21/POTT

Travelling Wave Diferencial
▶

ETW87
Método

Y
Arquivo...

TP50P
TP50G

2.26119
0.16139

Falta Monofásica (AT)

Falta Bifásica (AB)

Falta Trifásica (ABC)

54.7447	-32.7833	933.854	-87.3368	1044.4	-109.19
54.0244	-32.4448	894.37	109.318	1044.4	130.81

Selecionar Arquivos

Nós

Resistência Falta

Sem Falta (.lis)	
Falta AT (.lis)	
Falta AB (.lis)	
Falta ABC (.lis)	
Sem Falta (.atp)	:500kV_LTadj2.atp

BUS1A	X0005A	RF(A)
BUS1B	X0005B	RF(B)
BUS1C	X0005C	RF(C)

100

Figura 5.3. Ajustes da Proteção da TW87 para o Sistema Simples.

### AJUSTES DA PROTEÇÃO

TW87
TD32
TD21/POTT

Incremental Quantity Directional
▶

Método

Arquivo ...

TD32ZF

TD32ZR

0.152451

1.695

Falta Trifásica (ABC)

74564.1	-82.6296
411862	-179.202

Selecionar Arquivos

Nós

Sem Falta (.lis)	
Falta ABC (.lis)	
Sem Falta (.atp)	C:\tccatp\quickse

BUS1A	X0003A
BUS1B	X0003B
BUS1C	X0003C

Figura 5.4. Ajustes da Proteção da TD32 para o Sistema Simples.

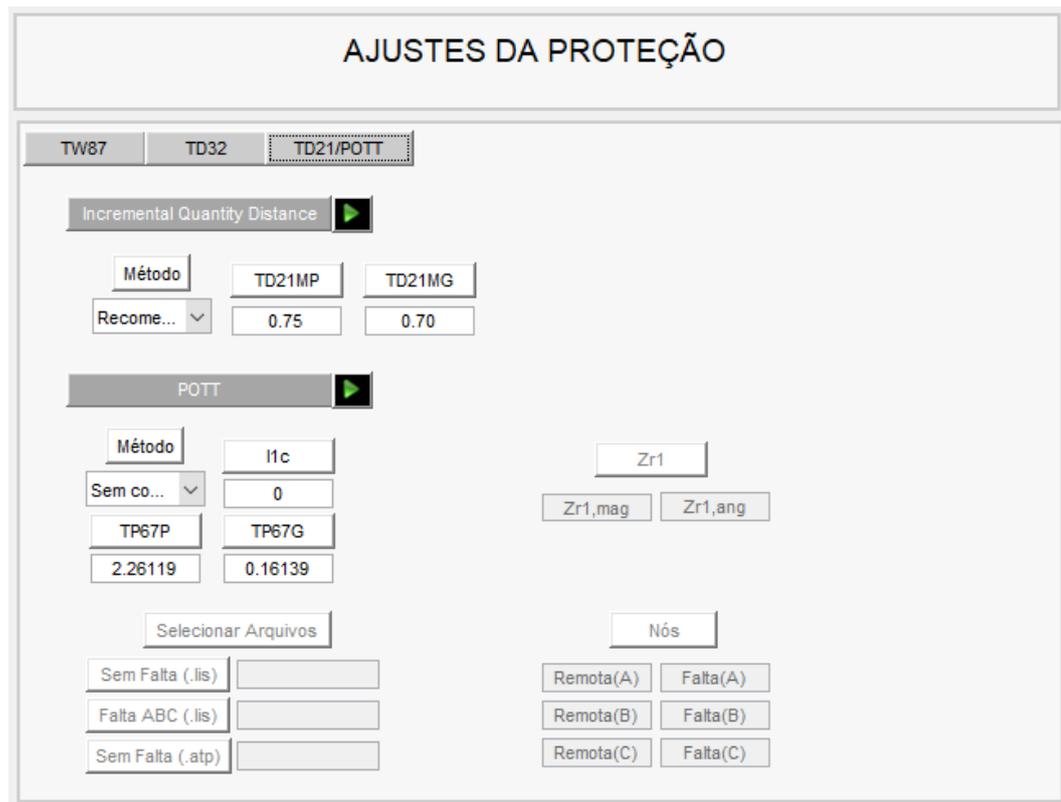


Figura 5.5. Ajustes da Proteção da TD21 e POTT para o Sistema Simples.

### 5.1.2 Sistema Complexo

A Figura 5.6 ilustra um sistema elétrico de potência modelado e simulado em ATP. Trata-se de um circuito equivalente de um sistema de transmissão real do SIN, localizado na região norte, que também será utilizado para avaliar as vantagens do uso do LIGHTSET no processo de parametrização dos ajustes do relé SEL-T400L.

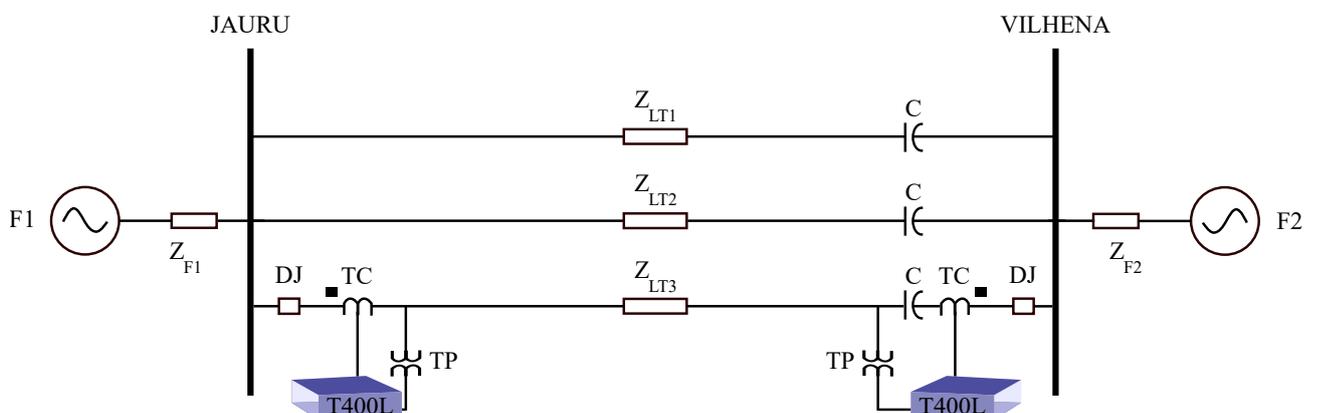


Figura 5.6. Configuração do Sistema Complexo no ATP.

O Sistema Complexo opera em 230 kV/60 Hz e possui três circuitos de transmissão, com aproximadamente 344 km de extensão cada, operando em paralelo, que interligam as subestações Jauru e Vilhena. Sobretudo, destaca-se a presença de componentes elétricos importantes, como: compensadores *shunt* e série, fixos e estáticos, geradores e outros. Logo, equivale-se a um sistema mais complexo que representa um desafio maior à operação dos dispositivos de proteção, como o SEL-T400L.

Por fim, na Tabela 5.5 é possível observar os dados da LT protegida, quer dizer, do circuito 3.

**Tabela 5.5.** Dados do Sistema Complexo.

Dado	Valor
$Z_{LT1,sec}$	$22,41/82,43^\circ \Omega, sec$
$Z_{LT0,sec}$	$82,61/71,23^\circ \Omega, sec$
RTC	400
RTP	2000

### 5.1.2.1 Método LIGHTSET

Inicialmente, para realizar a parametrização do relé local e remoto utilizando o LIGHTSET, configurou-se a aba *Configurações Iniciais* para os dois equipamentos, como pode ser observado na Figura 5.7.

Em seguida, na aba *Ajustes da Proteção* e opção *TW87*, escolheu-se o método *Arquivo.atp*. Conforme foi explicado, por meio deste método o usuário precisa fornecer apenas o arquivo .atp do seu sistema e indicar os pontos onde se encontram o relé e a barra remota, onde será aplicada a falta. Visto isso, o programa calcula automaticamente os ajustes TP50G e TP50P, apresentado na Figura 5.8.

Na mesma aba, mas agora na opção *TD32*, optou-se pelo método *Manual*, sendo necessário fornecer diretamente os valores incrementais de corrente e tensão. A partir disso, a plataforma calcula automaticamente os ajustes TD32ZF e TD32ZR. Na Figura 5.9 essa parametrização pode ser observada.

Finalmente, na opção *TD21/POTT* foi escolhido para a TD21 o método *Recomendável*,

que já fornece os valores recomendáveis pelo fabricante. Ademais, para o POTT, foi utilizado o método *Com compensação série manual* no relé local e o método *Sem compensação série* no relé remoto para o cálculo dos ajustes TP67G e TP67P. Sobretudo, no método utilizado no relé local foi necessário fornecer a impedância equivalente de sequência positiva da barra remota, enquanto que no método do relé remoto não foi necessário fornecer dados adicionais, pois os ajustes TP67G e TP67P recebem o mesmo valor que o TP50G e TP50P, respectivamente. Na Figura 5.10 esses ajustes podem ser observados.

AC Input		Line Configuration	
CTRW	VNOM	Z1MAG	Z1ANG
1	115	22.41	82.43
CTRX	NFREQ	Z0MAG	Z0ANG
400	60	82.61	71.23
PTR	PHROT	LL	TWLPT
2000	ABC	344.16	1170.61
LINEI	OPCS	XC	EXTSC
IX	LINEI	10.46	Y
		LLUNIT	
		km	

(a)

AC Input		Line Configuration	
CTRW	VNOM	Z1MAG	Z1ANG
1	115	22.41	82.43
CTRX	NFREQ	Z0MAG	Z0ANG
400	60	82.61	71.23
PTR	PHROT	LL	TWLPT
2000	ABC	344.16	1170.61
LINEI	OPCS	XC	EXTSC
IX	LINEI	0	N
		LLUNIT	
		km	

(b)

**Figura 5.7.** Configurações Iniciais do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto.

Travelling Wave Diferencial

ETW87 Método

Falta Monofásica (AT)    Falta Bifásica (AB)    Falta Trifásica (ABC)

162.808	-35.965	741.141	-97.4988	777.653	-106.108
82.4686	-26.1832	709.755	126.827	778.274	134.442

Y Arquivo...

TP50P TP50G

1.67965 0.296413

Selecionar Arquivos

Sem Falta (.lis)

Falta AT (.lis)

Falta AB (.lis)

Falta ABC (.lis)

Sem Falta (.atp) C:\TCC\_ATP\novan

Nós

SE3JVA	VLJU3A	RF(A)
SE3JVB	VLJU3B	RF(B)
SE3JVC	VLJU3C	RF(C)

Resistência Falta

100

(a)

Travelling Wave Diferencial

ETW87 Método

Falta Monofásica (AT)    Falta Bifásica (AB)    Falta Trifásica (ABC)

29.9569	-4.06219	355.757	-83.9141	352.443	-84.2553
27.1821	-2.77864	344.038	155.044	343.628	153.958

Y Arquivo...

TP50P TP50G

0.760229 0.0676606

Selecionar Arquivos

Sem Falta (.lis)

Falta AT (.lis)

Falta AB (.lis)

Falta ABC (.lis)

Sem Falta (.atp) C:\TCC\_ATP\novan

Nós

X0004A	JUVL3A	RF(A)
X0004B	JUVL3B	RF(B)
X0004C	JUVL3C	RF(C)

Resistência Falta

100

(b)

Figura 5.8. Ajustes da Proteção da TW87 do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto.

Incremental Quantity Directional

Método

Manual

Falta Trifásica (ABC)

18167.82	-90.3
155360.8	174.8

TD32ZF TD32ZR

0.513086 3.63593

(a)

Incremental Quantity Directional

Método

Manual

Falta Trifásica (ABC)

4697.83	64.932
144157.9435	161.95

TD32ZF TD32ZR

1.84116 6.723

(b)

Figura 5.9. Ajustes da Proteção da TD32 do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto.

Incremental Quantity Distance

Método TD21MP TD21MG  
Recome... 0.75 0.70

POTT

Método I1c  
Com co...  
TP67P TP67G  
2.81998 1.62812

Zr1  
30.6861 97.0180

(a)

Incremental Quantity Distance

Método TD21MP TD21MG  
Recome... 0.75 0.70

POTT

Método I1c  
Sem co...  
TP67P TP67G  
0.760229 0.0676806

Zr1

(b)

**Figura 5.10.** Ajustes da Proteção da TD21 e POTT do Sistema Complexo para: (a) relé local e (b) relé remoto.

### 5.1.3 Síntese dos Ajustes

Apresentam-se a seguir, a síntese dos principais ajustes obtidos para cada um dos sistemas teste que posteriormente serão utilizados para avaliar o desempenho do LIGHTSET. Neste contexto, a Tabela 5.5 apresenta a parametrização feita no SEL-T400L para cada sistema testado:

Tabela 5.6. Síntese dos Ajustes.

Etapa	Ajuste	Sistema Simples Local	Sistema Simples Remoto	Sistema Complexo Jauru	Sistema Complexo Vilhena
Configurações Iniciais	Z1MAG	5,65 $\Omega_{sec}$	5,65 $\Omega_{sec}$	22,41 $\Omega_{sec}$	22,41 $\Omega_{sec}$
Configurações Iniciais	Z1ANG	83, 53°	83, 53°	82, 43°	82, 43°
Configurações Iniciais	Z1MAG	29,07 $\Omega_{sec}$	29,07 $\Omega_{sec}$	82,61 $\Omega_{sec}$	82,61 $\Omega_{sec}$
Configurações Iniciais	Z1ANG	74,67°	74,67°	71, 23°	71, 23°
Configurações Iniciais	PTR	4347,83 V	4347,83 V	2000 V	2000 V
Configurações Iniciais	CTRX	400 A	400 A	400 A	400A
Configurações Iniciais	XC	0 $\Omega_{sec}$	0 $\Omega_{sec}$	10,46 $\Omega_{sec}$	0 $\Omega_{sec}$
Configurações Iniciais	EXTSC	N	N	Y	N
Ajuste da Proteção (TW87)	TP50G	0,16 $A_{sec}$	0,16 $A_{sec}$	0,30 $A_{sec}$	0,10 $A_{sec}$
Ajuste da Proteção (TW87)	TP50P	2,26 $A_{sec}$	2,26 $A_{sec}$	1,68 $A_{sec}$	0,76 $A_{sec}$
Ajuste da Proteção (TD32)	TD32ZF	0,15 $\Omega_{sec}$	0,15 $\Omega_{sec}$	0,51 $\Omega_{sec}$	1,84 $\Omega_{sec}$
Ajuste da Proteção (TD32)	TD32ZR	1,69 $\Omega_{sec}$	1,69 $\Omega_{sec}$	3,64 $\Omega_{sec}$	6,72 $\Omega_{sec}$
Ajuste da Proteção (TD21)	TD21MG	0,70 pu	0,70 pu	0,70 pu	0,70 pu
Ajuste da Proteção (TD21)	TD21MP	0,75 pu	0,75 pu	0,75 pu	0,75 pu
Ajuste da Proteção (POTT)	TP67G	0,16 $A_{sec}$	0,16 $A_{sec}$	1,63 $A_{sec}$	0,10 $A_{sec}$
Ajuste da Proteção (POTT)	TP67P	2,26 $A_{sec}$	2,26 $A_{sec}$	2,82 $A_{sec}$	0,76 $A_{sec}$

## 5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Esta seção tem o objetivo de avaliar os ajustes parametrizados pelo LIGHTSET por meio da simulação de curtos-circuitos no Sistema Simples e no Sistema Complexo com base no desempenho do SEL-T400L. Neste contexto, os casos foram escolhidos visando curtos perto da sensibilidade ajustada para entender se o ajuste está de fato como esperado. Isso incluem eventos menos e mais sensíveis que o ajuste para verificar a fronteira entre atuação e não atuação. A seguir, os resultados serão apresentados individualmente para cada sistema.

A metodologia de teste utilizada foi a funcionalidade de *playback* do SEL-T400L. Esta metodologia inicia-se a partir de um arquivo .atp que contém a modelagem do sistema a ser analisado pelo relé. Posteriormente, a partir do arquivo .pl4 gerado após simulação do .atp, obtém-se o arquivo COMTRADE com o auxílio da ferramenta GTPPLOT do ATP. Em sequência, a partir do Quickset converte-se o arquivo COMTRADE para o formato PLAYBACK (.ply). Ao final da conversão, o arquivo .ply é carregado na memória do relé e dado início o teste. Por último, terminado o teste, analisa-se os resultados por meio da ferramenta SynchroWAVE Event.

### 5.2.1 Sistema Simples

Visando validar os ajustes, foram simulados 13 casos de defeitos na rede. Apresenta-se na Tabela 5.7 todos os casos testados. Com o objetivo de validar os ajustes TP50P, TP50G, TP67P e TP67G foram simulados situações próximas às utilizadas na hora da parametrização, isto é, cenário de fonte forte local e fonte fraca remota. Além disso, foram aplicadas faltas bifásicas e monofásicas no início da LT adjacente a jusante do terminal local (casos 1 e 2) e no final da LT monitorada (casos 3, 4, 5 e 6), com o intuito de validar situações que a supervisão por sobrecorrente deveria atuar e também que não deveria.

Visando validar os ajustes TD32ZF e TD32ZR, foram aplicadas faltas monofásicas variando a fonte local (caso 7) e a localização da falta (casos 8 e 9), obtendo assim situações em que fosse desejado que a função TD32 atuasse e que não atuasse.

Por fim, para validar os ajustes TD21MP e TD21MG, foram realizados casos em situações críticas. Aplicou-se então um curto monofásico e bifásico próximo ao limite da cobertura da TD21 (casos 10 e 12), desejando-se que houvesse a sua atuação; e fora da cobertura (casos 11 e 13), esperando-se que não houvesse a sua atuação.

**Tabela 5.7.** Tempo de atuação do relé local para o Sistema Simples.

Caso	Falta	Local	SIRL	TRIP	TW87	TD32	TW32	TD21
1	AT (100 $\Omega$ )	LTADJ2 (10%)	5,00	-	-	-	0,1 ms	-
2	AB (Franco)	LTADJ2 (10%)	5,00	-	-	1,7 ms	0,1 ms	-
3	AT (100 $\Omega$ )	LT (90%)	5,00	0,7 ms	0,8 ms	1,5 ms	0,1 ms	-
4	AB (Franco)	LT (90%)	5,00	0,7 ms	3,0 ms	1,2 ms	$\approx 0$ ms*	-
5	AT (100 $\Omega$ )	LT (99%)	5,00	0,5 ms	0,9 ms	-	$\approx 0$ ms*	-
6	AT (150 $\Omega$ )	LT (99%)	5,00	0,5 ms	-	-	$\approx 0$ ms*	-
7	AT (Franco)	LT (1%)	0,10	1,0 ms	1,4 ms	1,0 ms	$\approx 0$ ms*	1,5 ms
8	AT (Franco)	LT (50%)	0,05	0,8 ms	0,8 ms	1,2 ms	0,1 ms	4,2 ms
9	AT (Franco)	LTADJ1 (50%)	0,05	-	-	-	-	-
10	AT (Franco)	LT (60%)	0,05	0,7 ms	0,7 ms	1,2 ms	$\approx 0$ ms*	9,3 ms
11	AT (Franco)	LT (85%)	0,05	0,7 ms	0,8 ms	1,3 ms	0,1 ms	-
12	AB (Franco)	LT (60%)	0,05	0,7 ms	0,7 ms	1,3 ms	$\approx 0$ ms*	7,5 ms
13	AB (Franco)	LT (85%)	0,05	0,8 ms	0,8 ms	1,3	0,1 ms	-

\*Valores inferiores a 0,1ms.

### 5.2.1.1 Análise pontual dos casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os ajustes TP50G e TP50P

Apresenta-se na Tabela 5.8 os tempos obtidos para os ajustes da função TW87. Sobretudo, o canal de comunicação não foi incluído nos testes.

**Tabela 5.8.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TW87 para o Sistema Simples.

Caso	Falta	Local	SIRL	TRIP	OC87AB	OC87AG	TW87
1	AT (100 $\Omega$ )	LTADJ2 (10%)	5,00	-	-	0,9 ms	-
2	AB (Franco)	LTADJ2 (10%)	5,00	-	-	1,0 ms	-
3	AT (100 $\Omega$ )	LT (90%)	5,00	0,7 ms	-	0,8 ms	0,8 ms
4	AB (Franco)	LT (90%)	5,00	0,7 ms	3,0 ms	0,8 ms	3,0 ms
5	AT (100 $\Omega$ )	LT (99%)	5,00	0,5 ms	-	0,9 ms	0,9 ms
6	AT (150 $\Omega$ )	LT (99%)	5,00	0,5 ms	-	7,4 ms	-

Nos casos 1 e 2 foram aplicados curtos monofásicos AT de 100  $\Omega$  e bifásicos AB, representando as mesmas situações utilizadas na parametrização. Entretanto, essas faltas foram aplicadas no início da LT adjacente (casos 1 e 2) e no final da LT monitorada (casos 3 e 4), quer dizer, faltas mais distantes onde a supervisão por sobrecorrente não conseguiria ser sensibilizada e faltas mais próximas onde ela atuaria.

Com base no tempo de atuação do *trip* obtido, observa-se que o relé local atuou devidamente nos quatro casos. Nos casos 1 e 2 onde as supervisões de sobrecorrente não deveriam atuar, houve a atuação da variável do *loop* monofásico (OC87AG). Todavia, mesmo com a atuação da supervisão por sobrecorrente a TW87 não atuou, o que não acarretou em *trip* indevido. Devido ao fato que sua parametrização a torna muito sensível, pois além do cenário retratado anteriormente, é aplicado a ela um fator de 50% de confiabilidade, aumentando sua sensibilidade. Dessa forma, por mais que a atuação da OC87AG nos casos 1 e 2 não seja esperada, ela é aceitável. Ou seja, a aplicação de uma falta nos mesmos cenários que foram utilizados na parametrização, mas sendo externa, não foi o suficiente para superar essa alta sensibilidade. Sobretudo, por ser a única supervisão não direcional do relé, deseja-se exatamente que ela tenha uma atuação em quase todas as faltas.

Nos casos 3 e 4 é possível perceber que a OC87AG e a OC87AB atuaram conforme era esperado. Ademais, observa-se que no caso 4 houve uma atuação mais rápida da OC87AG para uma falta bifásica. No entanto, a TW87 só atuou quando houve a confirmação da OC87AB.

Analisando os casos 5 e 6 é possível observar a atuação da supervisão por sobrecorrente em

casos críticos a partir da variação da resistência de falta. No caso 5 foi simulado a situação mais próxima do cenário crítico de parametrização, e o resultado foi como o esperado, atuação da OC87AG e da TW87. Por outro lado, no caso 6 aplicou-se uma resistência de falta bem superior a utilizada na parametrização, o que não foi suficiente para bloquear a atuação da OC87AG, mas foi suficiente para não haver a atuação da TW87, como era o desejado.

### 5.2.1.2 Análise pontual dos casos 7, 8 e 9 para os ajustes TD32ZF e TD32ZR

Apresenta-se na Tabela 5.9 os tempos obtidos para os ajustes da função TD32.

**Tabela 5.9.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD32 para o Sistema Simples.

Caso	Falta	Local	SIRL	TRIP	TD32F	TD32R
7	AT (Franco)	LT (1%)	0,1	1,0 ms	1,0 ms	-
8	AT (Franco)	LT (50%)	0,05	0,8 ms	1,2 ms	-
9	AT (Franco)	LTADJ1 (50%)	0,05	-	-	1,1 ms

O caso 7 consiste em uma falta no início da LT monitorada. Sobretudo, colocou-se uma fonte local mais fraca desejando que a TD32F não atuasse, o que não aconteceu como o esperado. Esta atuação pode ser explicada devido à margem de 70% que é aplicada a ela na hora da parametrização tornando-a mais sensível, que é recomendada pelo fabricante. Sendo assim, mesmo uma fonte local mais fraca não foi suficiente pra suprir a sensibilidade calculada na parametrização. Entretanto, por ser um curto dentro da LT monitorada, a atuação da TD32F é correta.

Por outro lado, no caso 8 era esperado que a TD32F atuasse e que a TD32R não atuasse, o que ocorreu exatamente como o desejado. Além disso, no caso 9 que foi aplicado um curto na LT adjacente, a TD32F não atuou e a TD32R atuou, validando dessa forma os ajustes feitos pelo LIGHTSET. Por fim, o relé deu o *trip* devido em todos os casos.

### 5.2.1.3 Análise pontual dos casos 10, 11, 12 e 13 para os ajustes TD21MP e TD21MG

Apresenta-se na Tabela 5.10 os tempos obtidos para os ajustes da função TD21.

**Tabela 5.10.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD21 para o Sistema Simples.

Caso	Falta	Local	SIRL	TRIP	TD21G	TD21P
10	AT (Franco)	LT (60%)	0,05	0,7 ms	9,3 ms	-
11	AT (Franco)	LT (85%)	0,05	0,7 ms	-	-
12	AB (Franco)	LT (60%)	0,05	0,7 ms	-	7,5 ms
13	AB (Franco)	LT (85%)	0,05	0,8 ms	-	-

Nos casos 10 e 12 houve devida atuação da TD21G e TD21P, respectivamente, pois o curto estava dentro da cobertura desses ajustes parametrizados pelo LIGHTSET. Além disso, nos casos 11 e 13 não houve atuação da TD21, o que também era esperado, já que a TD21 é uma função de subbalance, sendo a falta aplicada fora da cobertura de atuação. Por fim, conclui-se que a função TD21 atuou corretamente para todos os casos.

#### 5.2.1.4 Análise pontual dos casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os ajustes TP67G e TP67P

Como no sistema simples não há compensação série, os ajustes TP67G e TP67P obtiveram os mesmos valores de parametrização da TP50G e TP50P, respectivamente. Dessa maneira, serão analisados aqui os mesmos casos apresentados anteriormente, mas agora observando particularmente a supervisão por sobrecorrente do esquema POTT. Na Tabela 5.11 são apresentados os tempos de atuações obtidos.

**Tabela 5.11.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes do esquema POTT para o Sistema Simples.

Caso	Falta	Local	SIRL	TRIP	OCTPAB	OCTPAG
1	AT (100 $\Omega$ )	LTADJ2 (10%)	5,00	-	-	-
2	AB (Franco)	LTADJ2 (10%)	5,00	-	-	-
3	AT (100 $\Omega$ )	LT (90%)	5,00	0,7 ms	-	-
4	AB (Franco)	LT (90%)	5,00	0,7 ms	3,0 ms	2,4 ms
5	AT (100 $\Omega$ )	LT (99%)	5,00	0,5 ms	-	-
6	AT (150 $\Omega$ )	LT (99%)	5,00	0,5 ms	-	-

Analisando os resultados, observa-se que a supervisão por sobrecorrente do esquema POTT, mesmo com valores de parametrização semelhantes à supervisão da TW87, é menos sensível. Nos casos 1 e 2 ela não atuou, conforme era o esperado, pois o cenário foi semelhante ao utilizado no ajuste, mas com a localização da falta na LT adjacente. Por outro lado, nos casos 3 e 4 onde se desejava a atuação, houve apenas no caso 4. Todavia, por ser um caso próximo ao limite

de atuação, a não atuação no caso 3 é aceitável. Sobretudo, nos casos 5 e 6 que são próximos aos limites, também é justificável a não atuação desta supervisão. Por fim, a OCTP atuou satisfatoriamente em todos os casos analisados, validando dessa forma os ajustes configurados pelo LIGHTSET.

### 5.2.2 Sistema Complexo

Visando validar os ajustes, foram simulados 14 casos de defeitos na rede complexa. Apresenta-se na Tabela 5.12 todos os casos testados. Com o objetivo de validar os ajustes TP50P, TP50G, TP67P e TP67G foram simulados situações próximas às utilizadas na hora da parametrização, isto é, foram aplicadas faltas bifásicas e monofásicas no início da LT adjacente à frente do terminal remoto (casos 1 e 2) e no final da LT monitorada (casos 3, 4, 5 e 6), com o intuito de validar situações que a supervisão por sobrecorrente deveria atuar e também que não deveria.

**Tabela 5.12.** Tempo de atuação do relé local para o Sistema Complexo.

Caso	Falta	Local	TRIP	TW87	TD32	TW32	TD21
1	AT (100 $\Omega$ )	LT externa direta (10%)	-	-	2,1 ms	-	-
2	AB (Franco)	LT externa direta (10%)	-	-	2,1 ms	0,1 ms	-
3	AT (100 $\Omega$ )	LT (90%)	0,1 ms	1,2 ms	1,1 ms	$\approx 0$ ms*	-
4	AB (Franco)	LT (90%)	1,1 ms	1,2 ms	1,1 ms	-	-
5	AT (100 $\Omega$ )	LT (99%)	0,2 ms	1,2 ms	1,2 ms	$\approx 0$ ms*	-
6	AT (150 $\Omega$ )	LT (99%)	0,2 ms	1,2 ms	1,3 ms	$\approx 0$ ms*	-
7	AT (Franco)	LT (50%)	1,0 ms	1,2 ms	1,0 ms	$\approx 0$ ms*	-
8	AT (Franco)	LT externa reversa (50%)	-	-	-	-	-
9	AT (Franco)	LT (60%)	0,9 ms	1,2 ms	1,1 ms	0,1 ms	-
10	AT (Franco)	LT (85%)	0,3 ms	1,2 ms	1,1 ms	-	-
11	AB (Franco)	LT (60%)	0,9 ms	1,3 ms	1,1 ms	0,1 ms	-
12	AB (Franco)	LT (85%)	0,4 ms	1,2 ms	1,1 ms	$\approx 0$ ms*	-
13	AT (Franco)	LT (40%)	1,0 ms	1,5 ms	1,0 ms	0,1 ms	2,1 ms
14	AB (Franco)	LT (40%)	1,0 ms	1,4 ms	1,0 ms	$\approx 0$ ms*	2,3 ms

\*Valores inferiores a 0,1ms.

Visando validar os ajustes TD32ZF e TD32ZR, foram aplicadas faltas monofásicas variando a localização da falta (casos 7 e 8), obtendo assim situações em que fosse desejado que a função TD32 atuasse e que não atuasse.

Por fim, para validar os ajustes TD21MP e TD21MG, foram realizados casos em situações

críticas. Aplicou-se então curtos monofásicos e bifásicos próximos ao limite da cobertura da TD21 (casos 9, 11, 13 e 14), desejando-se que houvesse a sua atuação; e fora da cobertura (casos 10 e 12), esperando-se que não houvesse a sua atuação.

### 5.2.2.1 Análise pontual dos casos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 para os ajustes TP50G e TP50P

Apresenta-se na Tabela 5.13 os tempos obtidos para os ajustes da função TW87.

**Tabela 5.13.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TW87 para o Sistema Complexo.

Caso	Falta	Local	TRIP	OC87AB	OC87AG	TW87
1	AT (100 $\Omega$ )	LT externa direta (10%)	-	-	1,5 ms	-
2	AB (Franco)	LT externa direta (10%)	-	2,8 ms	1,4 ms	-
3	AT (100 $\Omega$ )	LT (90%)	0,1 ms	-	0,7 ms	1,2 ms
4	AB (Franco)	LT (90%)	1,1 ms	1,2 ms	0,6 ms	1,2 ms
5	AT (100 $\Omega$ )	LT (99%)	0,2 ms	-	0,9 ms	1,2 ms
6	AT (150 $\Omega$ )	LT (99%)	0,2 ms	-	1,1 ms	1,2 ms

Assim como nos casos do Sistema Simples, nos casos 1 e 2 do Sistema Complexo foram aplicados curtos monofásicos AT de 100  $\Omega$  e bifásicos AB, representando as mesmas situações utilizadas na parametrização. Entretanto, essas faltas foram aplicadas no início da LT adjacente (casos 1 e 2) e no final da LT monitorada (casos 3 e 4), quer dizer, faltas externas onde as supervisões de sobrecorrente não deveriam atuar e faltas internas onde elas deveriam atuar, respectivamente.

Inicialmente, observou-se que o relé atuou devidamente em todos os casos. Entretanto, nos casos 1 e 2 em que as supervisões de sobrecorrente não deveriam atuar, acabaram atuando. Todavia, conforme supracitado, mesmo com a atuação da supervisão por sobrecorrente a TW87 não atuou, o que não acarretou em um *trip* indevido. Sobretudo, como a parametrização dos ajustes da supervisão por sobrecorrente da TW87 é realizada desejando alta sensibilidade, mesmo a falta sendo externa ela ainda pode ser sensibilizada.

Nos casos 3 e 4 é possível perceber que a OC87AG e a OC87AB atuaram conforme era esperado. Ademais, observa-se que a TW87 atuou devidamente em todos os casos também.

Analisando os casos 5 e 6 é possível observar a atuação da supervisão por sobrecorrente em casos críticos a partir da variação da resistência de falta. No caso 5 foi simulado uma falta com

localização e resistência de falta de  $100 \Omega$  críticos, e o resultado foi como o esperado, atuação da OC87AG e da TW87. Por outro lado, no caso 6 aplicou-se uma resistência de falta superior de  $150 \Omega$ , o que não foi suficiente para bloquear a atuação da OC87AG e da TW87. Entretanto, por se tratar de uma falta dentro da LT monitorada, essas atuações devem ser interpretadas como corretas.

### 5.2.2.2 Análise pontual dos casos 7 e 8 para os ajustes TD32ZF e TD32ZR

Apresenta-se na Tabela 5.14 os tempos obtidos para os ajustes da função TD32.

**Tabela 5.14.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD32 para o Sistema Complexo.

Caso	Falta	Local	TRIP	TD32F	TD32R
7	AT (Franco)	LT (50%)	1,0 ms	1,0 ms	-
8	AT (Franco)	LT externa reversa (50%)	-	-	1,6 ms

O caso 7 consiste em uma falta na metade da LT protegida e o caso 8 na metade da LT adjacente atrás da barra local. Dessa forma, a TD32F atuou conforme o esperado para o caso 7 e a TD32R para o caso 8. Por fim, o relé se comportou corretamente nos dois casos, atuando para o caso 7 e não atuando para o caso 8.

### 5.2.2.3 Análise pontual dos casos 9, 10, 11, 12, 13 e 14 para os ajustes TD21MP e TD21MG

Apresenta-se na Tabela 5.15 os tempos obtidos para os ajustes da função TD21.

**Tabela 5.15.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes da TD21 para o Sistema Complexo.

Caso	Falta	Local	TRIP	TD21G	TD21P
9	AT (Franco)	LT (60%)	0,9 ms	-	-
10	AT (Franco)	LT (85%)	0,3 ms	-	-
11	AB (Franco)	LT (60%)	0,9 ms	-	-
12	AB (Franco)	LT (85%)	0,4 ms	-	-
13	AT (Franco)	LT (40%)	1,0 ms	2,1 ms	-
14	AB (Franco)	LT (40%)	1,0 ms	-	2,3 ms

Os casos 9 e 11 foram simulados com o intuito de prover a atuação da TD21G e TD21P,

respectivamente. Entretanto, não houve a atuação em nenhum dos dois casos, isso pode ser explicado pelo fato que o Sistema Complexo possui acoplamento mútuo, o que resulta em uma impedância mútua entre as LTs. Dessa maneira, quando ocorre uma falta na LT protegida, as LTs em paralelo podem gerar uma tensão induzida na LT protegida, o que pode acarretar no subbalcance da TD21, já que ela se baseia em tensões. Logo, simulou-se faltas mais próximas do relé local, casos 13 e 14, e observou-se a devida atuação da função TD21. Por fim, os casos 10 e 12 consistiam em faltas fora da zona de cobertura da TD21, ou seja, não era esperado a atuação da TD21 e foi exatamente o que aconteceu.

#### 5.2.2.4 Análise pontual dos casos para os ajustes TP67P e TP67G

Apresenta-se na Tabela 5.16 os tempos obtidos para os ajustes da função de sobrecorrente do esquema POTT.

**Tabela 5.16.** Tempo de atuação do relé local dos ajustes do esquema POTT para o Sistema Complexo.

Caso	Falta	Local	TRIP	OCTPAB	OCTPAG
1	AT (100 $\Omega$ )	LT externa direta (10%)	-	-	2,3 ms
2	AB (Franco)	LT externa direta (10%)	-	1,7 ms	1,9 ms
3	AT (100 $\Omega$ )	LT (90%)	0,1 ms	-	1,0 ms
4	AB (Franco)	LT (90%)	1,1 ms	0,7 ms	0,8 ms
5	AT (100 $\Omega$ )	LT (99%)	0,2 ms	-	1,3 ms
6	AT (150 $\Omega$ )	LT (99%)	0,2 ms	-	1,6 ms
7	AT (Franco)	LT (50%)	1,0 ms	1,3 ms	0,7 ms
8	AT (Franco)	LT externa reversa (50%)	-	-	-
9	AT (Franco)	LT (60%)	0,9 ms	1,3 ms	0,7 ms
10	AT (Franco)	LT (85%)	0,3 ms	1,3 ms	0,7 ms
11	AB (Franco)	LT (60%)	0,9 ms	0,7 ms	0,7 ms
12	AB (Franco)	LT (85%)	0,4 ms	0,6 ms	0,7 ms
13	AT (Franco)	LT (40%)	1,0 ms	1,2 ms	0,7 ms
14	AB (Franco)	LT (40%)	1,0 ms	0,6 ms	0,7 ms

Analisando os resultados, observa-se que a TP67 se comportou semelhantemente à TP50. Logo, atuou conforme o esperado em todos os casos.

# CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho, propõe-se uma plataforma alternativa para parametrização do relé SEL-T400L. Para facilitar o procedimento de ajuste do relé, o qual envolve conceitos relativamente novos para profissionais do setor elétrico, apresentou-se uma plataforma denominada LIGHTSET. Este programa é capaz de calcular os ajustes das funções de proteção no domínio do tempo baseadas em grandezas incrementais e princípios de OV's de forma mais prática e didática. A plataforma fornece explicações dos ajustes e instruções para calculá-los. Sobretudo, o LIGHTSET possibilita ao usuário o cálculo dos ajustes das funções utilizando sistemas modelados diretamente no ATP. Além disso, o programa possibilita ao usuário comunicação direta com o relé para leitura e envio de ajustes.

Para avaliar o LIGHTSET, foram considerados dois sistemas modelados no ATP: um sistema mais simples composto por uma LT principal e duas LTs adjacentes, e um sistema mais complexo composto por LTs em paralelo, compensação série e outros componentes elétricos. Em cada sistema foram aplicadas faltas com diferentes cenários visando validar individualmente cada ajuste. Desse modo, a partir da funcionalidade playback do SEL-T400L, foi possível verificar a correta atuação do relé para os diferentes casos de falta aplicados para avaliar o desempenho do programa.

Nos cenários de falta estudados, os resultados obtidos usando o LIGHTSET estiveram de acordo com o esperado teoricamente, comprovando a confiabilidade da plataforma. Foram testadas situações em que os ajustes deveriam atuar e em que eles não deveriam atuar para confirmar com precisão a correta atuação do relé em casos adversos. Sobretudo, demonstrou-se a utilidade do LIGHTSET no que diz respeito à praticidade da parametrização do SEL-T400L para diferentes sistemas. Além disso, sabendo que muitas das atuações incorretas da proteção são decorrentes de falha humana no que diz respeito ao cálculo de ajustes, obtém-se com o uso do LIGHTSET uma redução dessas atuações incorretas, já que a plataforma reduz os cálculos

---

externos e integra-os na sua automatização. Apesar disso, ressalta-se o cuidado ao elaborar ajustes para sistemas modelados, o que requer atenção na indicação dos nós de interesse bem como na elaboração dos arquivos teste.

Dessa maneira, constata-se que os resultados obtidos são promissores devido ao grande interesse comercial de equipamentos de proteção que utilizam os princípios de grandezas incrementais e OV's para atuações no sistema, a exemplo de relés no domínio do tempo, como o SEL-T400L. Dessa forma, usando o LIGHTSET, torna-se mais fácil a utilização desses relés recentes no mercado e é possível reduzir erros de atuação da proteção por falhas humanas, já que a plataforma calcula de forma mais automática.

Como propostas de trabalhos futuros, destacam-se:

- Expandir a plataforma para outros relés fasoriais;
- Implementação de rotinas para permitir a interação com a funcionalidade de playback do SEL-T400L, o que viabilizará a leitura de registros reais obtidos pelo o relé;
- Inclusão de rotinas para simulação de diferentes tipos de faltas utilizando o sistema modelado pelo o usuário para avaliação dos ajustes;
- Ampliação da plataforma para auxílio do cálculo da fonte e da impedância equivalente local e remota para os cenários de fonte fraca e fonte forte, utilizados nos cálculos dos ajustes;
- Expandir o LIGHTSET para o relé SEL-T401L, incluindo o ajuste das novas funcionalidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EASTVEDT, R. B. *The need for Ultra-Fast Fault Clearing*. [S.l.], 1996. Citado na página 1.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional)*. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>>. Citado na página 1.
- FAYBISOVICH, V.; FEIGINOV, M.; KHOROSHEV, M. I. Investigation of frequency domain traveling wave fault location methods. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, p. 1–0, 2010. Citado na página 9.
- FILHO, J. ao M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: LTC, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 5, 6, 7, and 8.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. *Power System Analysis and Design*. 5. ed. [S.l.]: CENGAGE Learning, 2011. Citado na página 15.
- GRID, A. Network protection - automation guide. *Alstom Grid*, 2011. Citado na página 7.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power System Relaying*. [S.l.]: JWE - JOHN WILEY (3. ed.), 2008. Citado na página 5.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. ao. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. [S.l.]: Editora Edgard Blucher Ltda (2. ed.), 2010. Citado na página 1.
- KASZTENNY, B.; GUZMAN, A.; FISCHER, N.; MYNAM, M. V.; TAYLOR, D. *Practical setting considerations for protective relays that use incremental quantities and traveling waves*. [S.l.], 2016. Citado 7 vezes nas páginas 13, 19, 25, 27, 32, 51, and 53.
- KINDERMANN, G. *Curto-Circuito*. [S.l.]: Sagra Luzzatto (2. ed.), 1997. Citado na página 6.
- KUSEL, B. F. *Um novo algoritmo de estimação de fasores para a proteção de distância de linhas de transmissão*. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, dez. 2011. Citado na página 7.
- LOPES, e. D. F. J. e. W. L. A. N. F. V. *Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão via Transformada de Park*. Foz do Iguaçu, Brasil, 2014. Nenhuma citação no texto.
- 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 de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, mai. 2014. Citado na página 9.
- LOPES, F. V.; HONORATO, T. R.; REIS, R.; FERNANDES, R. Prevention of human errors in transmission line protection and fault location functions by eliminating the need for settings. *CIGRE Technical Exhibition*, ago 2020. Citado na página 3.

LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G.; JR, E. J. S. L.; SILVA, K. M. Parametric analysis of the traveling wave-based differential protection tw87. *The IET 14th International Conference on Developments in Power System Protection*, mar 2018. Nenhuma citação no texto.

OLIVEIRA, A. V. da C. *Proposição de um modelo para análise de fluxo de carga, curto-circuito e simulação de relés de proteção*. Dissertação (Dissertação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, dez. 2004. Citado na página 5.

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, 2020. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/extensao\\_linhastransmissao.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/extensao_linhastransmissao.aspx)>. Citado na página 1.

RAO, T. S. M. *Power System Protection Static Relays*. [S.l.]: McGraw Hill Higher Education (2. ed.), 1989. Citado na página 6.

RIBEIRO, E. P. A.; LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P.; LEITE, E. *ATP/MODELS Differentiator-Smoother Filter Model Validated Using Actual Time-Domain Relay*. [S.l.], 2018. Citado na página 16.

RIBEIRO, J. ao P. G. *Estudo e Implementação de Funções de Proteção no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L*. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, mai. 2017. Citado 7 vezes nas páginas iv, 11, 16, 19, 22, 27, and 32.

RIBEIRO, J. ao P. G. *Estudo e Avaliação das Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo Disponíveis no Relé SEL-T400L*. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, dez. 2019. Citado 9 vezes nas páginas iv, 11, 19, 20, 21, 28, 30, 31, and 32.

RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V. Modeling and simulation of a time-domain line protection relay. *The IET 14th International Conference on Developments in Power System Protection*, mar 2018. Nenhuma citação no texto.

RIBEIRO, L. M. A. *Estudo do Filtro Digital Differentiator-Smoother para Aplicações baseadas na teoria de Ondas Viajantes*. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, dez. 2019. Citado 2 vezes nas páginas iv and 17.

SAHA, J. I. e. E. R. M. M. *Fault Location on Power Networks*. [S.l.]: Springer, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 2, 9, and 15.

SCHWEITZER, E. O.; GUZMAN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B. *Locating Faults by the Traveling Waves They Launch*. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas iv, 14, and 16.

SCHWEITZER, E. O.; III; BOGDAN; GUZMAN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. *Speed of Line Protection - Can We Break Free of Phasor Limitations?* [S.l.], 2015. Citado 6 vezes nas páginas 2, 10, 11, 12, 14, and 19.

SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. *Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults*. [S.l.], 2015. Citado 5 vezes nas páginas 2, 11, 19, 23, and 29.

SEL. *Ultra-High-Speed Transmission Line Relay Traveling-Wave Fault Locator High-Resolution Event Recorder*. [S.l.], 2019. Citado 14 vezes nas páginas iv, v, 15, 17, 18, 21, 22, 25, 26, 29, 38, 39, 41, and 42.

SLUIS, L. van der. *Transients in Power Systems*. [S.l.]: Wiley, 2001. Citado na página 15.

TLEIS, N. D. *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. [S.l.]: Elsevier, 2008. Citado na página 1.

ZANETTA, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Edusp, 2003. Citado na página 9.