



**SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DE TESTES NO RELÉ
SEL-T400L**

TIAGO DA ROCHA HONORATO

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DE TESTES NO RELÉ
SEL-T400L**

TIAGO DA ROCHA HONORATO

ORIENTADOR: KLEBER MELO E SILVA

COORIENTADOR: FELIPE VIGOLVINO LOPES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM - 745/20

BRASÍLIA/DF: JULHO - 2020

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

**SISTEMA PARA AUTOMAÇÃO DE TESTES NO RELÉ
SEL-T400L**

TIAGO DA ROCHA HONORATO

Dissertação de mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

APROVADA POR:

Francisco Assis de Oliveira Nascimento, Doutor (ENE-UnB)
(Presidente)

Mário Oleskovicz, Doutor (USP)
(Examinador Externo)

Leandro Ramos de Araújo, Doutor (UFJF)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 6 de Julho de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

HONORATO, TIAGO DA ROCHA

Sistema para Automação de Testes no Relé SEL-T400L. [Distrito Federal] 2020.
xiii, 82p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre em Engenharia Elétrica, 2020).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|---------------|----------------------------|
| 1. SEL-T400L | 2.Domínio do Tempo |
| 3. Python | 4.Testes e Comissionamento |
| 5. Automação | |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HONORATO, T. R. (2020). Sistema para Automação de Testes no Relé SEL-T400L, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-745/20 OU PPGENE.TD-745/20, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tiago da Rocha Honorato

TÍTULO: Sistema para Automação de Testes no Relé SEL-T400L

GRAU: Mestre ANO: 2020

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

Tiago da Rocha Honorato

Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento e potencialidades de um pacote, escrito em *Python*, com a finalidade de expandir as capacidades de teste no relé SEL-T400L. Por empregar unicamente grandezas no domínio do tempo nas lógicas de proteção, os requisitos de fidelidade dos sinais medidos pelo relé são significativamente mais elevados do que os relés tradicionais que utilizam grandezas fundamentais. Tal fato impacta diretamente nas técnicas tradicionais de testes, uma vez que o limite da ordem de *kilohertz* no espectro, embora suficiente para os relés com elementos fasoriais, não é satisfatório, principalmente com relação aos elementos baseados em ondas viajantes com requisitos da ordem de *megahertz*. Como resultado, novas técnicas tem sido desenvolvidas para permitir testes em relés baseados em domínio do tempo. Contudo, o mercado ainda carece de uma solução econômica e eficaz do ponto de vista técnico, logístico e que possua suporte para testes extensivos e automáticos com sinais realistas. De fato, testes extensivos são cruciais não somente para entender o funcionamento dos elementos de proteção, mas também para verificar a aplicabilidade de um relé e sua parametrização em um sistema particular.

Palavras-chave:

SEL-T400L, Domínio do Tempo, Python, Testes e Comissionamento, Automação.

ABSTRACT

In this dissertation, it is presented the development and achievements accomplished by a module, programmed in *Python*, intended to expand the SEL-T400L testing capabilities. Employing only time-domain-based protection, the measured signal fidelity requirements are considerably higher when compared with traditional phasor-based relays. This impacts directly the traditional testing methodologies, since signal representation in the order of *kilohertz*, even though enough for phasor-based relays, are not satisfactory, especially for testing traveling wave protection elements, with requirements in the order of *megahertz*. As a result, new testing methodologies have been developed in order to allow testing for time-domain-based relays. However, in terms of commercially available tools, there is no solution available that delivers support for extensive testing with original fidelity being also simple, economical and logistically viable for the end user. As a matter of fact, extensive testing is crucial to understand not only the protection elements operation, but also evaluate the applicability of a relay and its settings to a specific system.

Keywords:

SEL-T400L, Time-Domain, Python, Testing and Commissioning, Automation.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos	vi
Glossário	viii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização do Tema	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.4 Contribuição da Dissertação	3
1.5 Organização do Texto	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	6
2.1 Evolução dos Relés de Proteção	6
2.2 Evolução dos Dispositivos de Teste	8
2.3 Situação Atual dos Dispositivos de Teste	9
Capítulo 3 – Fundamentação Teórica	12
3.1 Distúrbios em Linhas de Transmissão	12
3.2 Propagação de Ondas Viajantes	13
3.3 Grandezas Incrementais	14
3.4 Relé SEL-T400L	16
3.4.1 Processamento Interno	18
3.5 Testes e Comissionamento	19
3.5.1 Desafios Atuais	22
3.5.2 <i>SEL Digital Playback</i>	23

3.5.2.1	Geração de Arquivos de Teste	24
3.5.2.2	Interação com o Relé	25
3.5.2.3	Implicações	27
Capítulo 4 – Implementação		29
4.1	Visão Geral	29
4.2	Orientação ao Objeto e Concorrência	30
4.3	Geração do Arquivo de Teste	33
4.4	Interação com o Relé	35
Capítulo 5 – Exemplo de Possíveis Análises		42
5.1	Aplicação 1: Avaliação Sistêmica	42
5.1.1	Linha de Transmissão Tucuruí-Xingu	42
5.1.2	Procedimento de Teste	43
5.1.3	Resultados	45
5.2	Aplicação 2: Avaliação Isolada	50
5.2.1	Linhas de Transmissão de Circuito Duplo	50
5.2.2	Proteção de Distância de Linhas de Transmissão	51
5.2.3	Procedimento de Teste	54
5.2.4	Resultados	56
Capítulo 6 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros		61
Referências Bibliográficas		63

LISTA DE FIGURAS

3.1	Momento de inserção da falta em uma oscilografia de um curto-circuito real com diferentes taxas de amostragem (a) 1 MHz (b) 10 kHz.	13
3.2	Diagrama de propagação para uma linha de transmissão de dois terminais. . . .	14
3.3	Teorema da sobreposição (SCHWEITZER <i>et al.</i> , 2015).	15
3.4	Resumo dos esquemas de proteção do relé SEL-T400L (SEL, 2020).	16
3.5	Diagrama de processamento interno do relé SEL-T400L (SEL, 2020).	18
3.6	Lógica interna de teste (SEL, 2020).	24
3.7	Programa padrão de geração do arquivo <i>playback</i>	25
3.8	Programa padrão de interação com o relé (SEL, 2020).	26
3.9	Procedimento padrão para realização do teste via arquivo <i>playback</i> em um único SEL-T400L a partir de arquivo COMTRADE.	27
4.1	Versão proposta para utilizar o recurso de teste do SEL-T400L.	30
4.2	Diferenças entre processamento de tarefas (a) sequenciais e (b) concorrentes . .	31
4.3	Comparação de duração de transferência de arquivo para dois relés na presença e ausência de <i>multithreading</i>	32
4.4	Estrutura de arquivos: (a) <i>.cff</i> (b) <i>.ply</i>	33
4.5	Versão proposta para utilizar o recurso de teste do SEL-T400L.	37
4.6	Exemplo de instanciação do objeto da classe <i>SEL_T400L</i> e execução da funcionalidade <i>playback</i>	39
4.7	Comparação de tempo para geração de arquivos e transferência para o relé. . . .	40

5.1	Sistema Interligado Nacional, conexão do complexo hidrelétrico de Belo Monte (EPE, 2017).	43
5.2	Sistema simulado para geração de eventos.	44
5.3	Percentual de atuação: (a) Xingu e (b) Tucuruí	45
5.4	Densidade de probabilidade para TD21: (a) TD21G em Tucuruí, (b) TD21G em Xingu, (c) TD21P em Tucuruí e (d) TD21P em Xingu.	47
5.5	Densidade de probabilidade para os elementos direcionais: (a) TD32 em Tucuruí, (b) TD32 em Xingu, (c) TW32 em Tucuruí e (d) TW32 em Xingu.	48
5.6	Densidade de probabilidade para TW87: (a)Tucuruí e (b) Xingu	49
5.7	Características de operação para proteção de distância: (a) <i>mho</i> e (b) domínio do tempo	53
5.8	Exemplificação do sistema modelagem e posicionamento das medições usadas para reprodução nos relés.	55
5.9	Comparação entre elementos de distância para o cenário base.	57
5.10	Comparação entre elementos de distância para o cenário base.	58
5.11	Comparação entre elementos de distância para o cenário base.	59

LISTA DE TABELAS

3.1	Resumo das funções de proteção, ajustes e aplicações (HENSLER <i>et al.</i> , 2017),(SEL, 2020).	17
-----	--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Δs	Grandeza Incremental
s	Sinal Medido
T	Período Fundamental
p	Número de ciclos
Z_{XT}	Impedância entre fase X e terra
Z_{XY}	Impedância entre fases X e Y
\hat{V}_X	Fasor de tensão na fase X
\hat{V}_Y	Fasor de tensão na fase Y
\hat{I}_X	Fasor de corrente na fase X
\hat{I}_Y	Fasor de corrente na fase Y
\hat{I}_0	Fasor de corrente de sequência zero
Z_{LT0}	Impedância de sequência zero da linha de transmissão
Z_{LT1}	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão
$V_{alcance}$	Tensão no ponto de alcance
$V_{relé}$	Tensão medida pelo relé
m	Alcance ajustado
I_Z	Corrente réplica
V_{op}	Tensão de operação
$\Delta V_{relé}$	Tensão incremental medida no ponto do relé

ΔI_Z Corrente réplica incremental

GLOSSÁRIO

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
A/D	<i>Analog/Digital</i>
COMTRADE	<i>Common Format for Transient Data Exchange</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DTT	<i>Direct Transfer Trip</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
GIL	<i>Global Interpreter Lock</i>
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
OV	<i>Onda Viajante</i>
POTT	<i>Permissive Overreach Transfer Trip</i>
RDP	<i>Registadores Digitais de Perturbação</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SEP	<i>Sistema Especial de Proteção</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>

TD21	<i>Time-Domain Distance Element</i>
TD32	<i>Time-Domain Directional Element</i>
TW32	<i>Traveling Wave Distance Element</i>
TW87	<i>Traveling Wave Differential Element</i>

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A energia elétrica é um dos recursos determinantes para o desenvolvimento socioeconômico. A continuidade no fornecimento só é possível por meio da integração eficiente entre os equipamentos que formam os subsistemas de geração, transmissão e distribuição. Tal integração é proveniente de cuidadosa operação e planejamento do sistema elétrico a fim de suprir a demanda, modernizar instalações e implementar novas tecnologias de maneira eficiente e sustentável. O sistema, contudo, está constantemente sujeito a distúrbios, mesmo que pouco perceptíveis pelos consumidores finais (HOROWITZ; PHADKE, 2008).

O aumento da complexidade do sistema elétrico, diretamente relacionado à sua expansão e à implementação de novas tecnologias, reflete nos requisitos dos sistemas de proteção. A fim de preservar a estabilidade do sistema e manter a integridade dos equipamentos, os sistemas de proteção, além de extinguir faltas mais rapidamente, precisam também manter confiabilidade e segurança (HOROWITZ; PHADKE, 2008). Portanto, desde o surgimento de relés numéricos microprocessados, a evolução tecnológica nos relés de proteção está diretamente ligada aos avanços computacionais concomitantes com a finalidade de aumentar desempenho e confiabilidade dos equipamentos (RUMMER; KEZUNOVIC, 1978; SCHWEITZER; ALIAGA, 1980).

Nesse contexto, os sistemas de proteção, nas últimas décadas, evoluíram para dispositivos multifunções combinados com o uso intensivo de comunicação e controle (BECKMAN *et al.*, 2016). Tais mudanças não só influenciaram os relés de proteção, mas também o sistema como um todo, permitindo monitoramento e operação remota (FRIEND *et al.*, 2014). Consequentemente, essa evolução tem permitido a implementação de algoritmos de proteção, como baseados puramente em ondas viajantes e grandezas incrementais, que até então não seriam possíveis, sem perda de funcionalidades com relação à automação, comunicação e captura de oscilogra-

fias, devido a elevados requisitos de capacidade computacional e altas taxas de amostragem (SCHWEITZER *et al.*, 2015), (SCHWEITZER *et al.*, 2016).

Por outro lado, essa evolução tecnológica que deu origem aos relés microprocessados também acarretou no desenvolvimento dos primeiros simuladores digitais. A técnica de reprodução de estados utilizada até então tinha limitações em termos de reproduzir a natureza real de eventos e impossibilitava análises mais detalhadas e extensivas (KEZUNOVIC; GALIJASEVIC, 1998). Dessa maneira, atualmente, a mesma situação se repete com a introdução de relés com algoritmos no domínio do tempo com altos requisitos de fidelidade transitória dos sinais, especialmente em alta frequência. Tais requisitos não são contemplados pelos testadores e amplificadores utilizados atualmente, já que os tais não são necessários para testes em relés fásorias (GUZMÁN *et al.*, 2018b).

1.2 MOTIVAÇÃO

A parametrização adequada dos equipamentos de proteção é fundamental para preservar o correto funcionamento do sistema e garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Dessa forma, os equipamentos de proteção devem ser ajustado e empregados de maneira que sejam capazes de identificar e atuar para defeitos para os quais foi projetado e seguros para não atuarem indevidamente.

Por outro lado, por serem implantados para lidar com eventos menos frequentes, situações normais de operação do sistema elétrico não permitem avaliar de fato se o esquema de proteção estará preparado para atuar em eventos críticos. Assim, testes anteriores à implantação em campo são a única forma de averiguar se um dado dispositivo ou esquema de proteção está adequado para uma aplicação. Além disso, como as situações operacionais do sistema elétrico e causas no momento de ocorrência de uma contingência não são previsíveis, é crucial que sejam empregados testes extensivos com o grau apropriado de realismo nos dispositivos de proteção variando as mais diversas características operacionais e de curtos-circuitos.

Tais avaliações são dificultadas em relés que empregam elementos de proteção baseados em análises no domínio do tempo, especialmente ondas viajantes, visto que os critérios de fidelidade reduzem o conjunto de metodologias de teste disponíveis que atendem os requisitos mínimos.

No momento atual, com o lançamento no mercado do relé SEL-T400L como o primeiro relé de proteção disponível comercialmente a implantar proteção por ondas viajantes, mesmo com os avanços do fabricante adicionando suporte para o relé receber arquivos de teste, não há uma forma eficiente do ponto de vista técnico e financeiro para avaliar extensivamente os elementos de proteção do relé SEL-T400L.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho de mestrado tem como principal objetivo adicionar suporte para testes extensivos no relé SEL-T400L, mantendo os requisitos de fidelidade exigidos para uma avaliação mais realista e prática das funções do relé com foco na automação, abstração de procedimentos e simplicidade para o usuário final. Para tanto, como objetivos específicos da pesquisa, destacam-se:

- Entendimento dos requisitos para testes dos elementos de proteção do SEL-T400L;
- Apuração do funcionamento da lógica de testes original do relé;
- Exploração das limitações de cada etapa de teste;
- Compatibilização direta com arquivos COMTRADE;
- Otimização para esquemas de testes com mais de um relé.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Dentre as contribuições desta dissertação, a principal é:

- Possibilitar a execução de testes extensivos e automáticos no relé SEL-T400L, eliminando qualquer interação requerida do usuário com o relé ou com geração de arquivos intermediários e também proporcionando melhor eficiência no processo principalmente pelo uso de concorrência de tarefas a fim de promover análises mais detalhadas do esquema de proteção e parametrização.

Durante a presente pesquisa de mestrado, foram desenvolvidos trabalhos que se relacionam diretamente com a elaboração e uso da solução de testes no SEL T400L, os quais são listados a seguir:

1. HONORATO, T. R.; RIBEIRO, J. P. G.; CUSTÓDIO, E. A.; SILVA, K. M. LOPES, F. V. Automated Testing Application for a Novel Playback Functionality on a Real Time-Domain Relay. *The IET 15th International Conference on Developments in Power System Protection*. Liverpool, Reino Unido, Março, 2020.
2. HONORATO, T. R.; SERPA, V. S.; RIBEIRO, J. P. G.; CUSTÓDIO, E. A.; SILVA, K. M.; LOPES, F. V. On Evaluating a Time-Domain Distance Element of a Rel Relay for Double-Circuit Transmission Line Protection. *The IET 15th International Conference on Developments in Power System Protection*. Liverpool, Reino Unido, Março, 2020.
3. LOPES, F. V.; HONORATO, T. R.; RIBEIRO, J. P. G.; SILVA, K. M. Parametric Sensitivity Analysis of Actual Transmission Line Time-Domain Protection Relay. *The IET 15th International Conference on Developments in Power System Protection*. Liverpool, Reino Unido, Março, 2020.
4. COSTA, J. S.; TOLEDO, R. T.; GAMA, L. A.; HONORATO, T. R.; LOPES, F. V.; PEREIRA JR, P. S. ; SALGE, G. S.; DAVI, M. J. B.B. Phasor-Based and Time-Domain Transmission Line Protection Considering Wind Power Integration. *The IET 15th International Conference on Developments in Power System Protection*. Liverpool, Reino Unido, Março, 2020.
5. FRANÇA, R. L.; SILVA JR, F. C.; HONORATO, T R.; RIBEIRO, J. P. G.; COSTA, F. B.; LOPES, F. V.; STRUNZ, K. Traveling Wave-Based Transmission Line Earth Fault Distance Protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020.
6. CUSTÓDIO, E. A.; RIBEIRO, J. P. G.; LOPES, F. V; HONORATO, T. R. Avaliação da Influência Transitória de TPCs Sobre Funções de Proteção Aplicadas nos Domínios da Frequência e do Tempo *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ (XVIII ERIAC)*. Foz do Iguaçu, Brasil, Maio, 2019.
7. LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G.; HONORATO, T. R.; SILVA, K. M.; REZENDE JR., J. N.; AVIZ, C. A. M.; FERNANDES, R. O. Time-Domain Relay Performance Evaluation Considering Brazilian Fault Cases. *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2019)*. Perpignan, França, Junho, 2019.

Ressalta-se que os trabalhos que não têm relação direta com o desenvolvimento da ferramenta tiveram grande importância na validação da solução, bem como nos aprimoramentos da mesma, cuja versão final é detalhada no presente trabalho, além de demonstrar a potencialidade de estudos e análises viabilizados.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A organização deste trabalho é realizada de acordo com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, incluindo evolução dos relés de proteção e equipamentos de teste, além de uma síntese das técnicas disponíveis na atualidade para testes de relés com elementos de proteção no domínio do tempo;
- No capítulo 3, é retratada a fundamentação teórica dos princípios de funcionamento do relé e impactos resultantes nas estratégias de testes existentes. Também é apresentado o procedimento de testes desenvolvido pelo fabricante do relé;
- No capítulo 4, é apresentada a ferramenta desenvolvida em conjunto com os desafios e soluções que foram implementados para melhor explorar os recursos do relé;
- No capítulo 5, são expostas amostras de análises proporcionadas pela ferramenta desenvolvida, com a finalidade de exemplificar o potencial do desenvolvimento feito.
- No capítulo 6, apresentam-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVOLUÇÃO DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

As investigações a respeito da utilização de computadores para atuar na proteção de sistemas elétricos começaram na década de 60 (MORRISON, 1967). Em 1969, Rockefeller publicou um trabalho propondo a implementação de um único computador para executar várias funções de proteção em uma subestação. Por meio de operações lógicas, o sistema proposto detectaria e localizaria faltas e enviaria o comando para abertura do respectivo disjuntor da subestação (ROCKEFELLER, 1969). Assim como outros trabalhos da época, a preocupação inicial de Rockefeller era a investigação da possibilidade de implementação das funções de proteção em um sistema computacional mesmo que não fosse economicamente competitiva no momento.

A possibilidade de implementação de computadores para funções de proteção levou a publicação de diversos trabalhos no tema no início da década de 70. Em 1971, Mann & Morrison propõem um método para estimação de fasores para proteção digital de linhas de transmissão. O método consistia em calcular a impedância da linha de transmissão a partir de amostras do sinal e sua derivada (MANN; MORRISON, 1971b). No mesmo ano, os autores apresentaram a implementação de um esquema de proteção de distância em um computador. A metodologia baseava-se na combinação do algoritmo de cálculo de impedâncias de linhas de transmissão, proposto no trabalho anterior, em conjunto com estratégias de detecção e classificação de faltas (MANN; MORRISON, 1971a).

Em 1972, Rockefeller & Udren publicaram um trabalho sobre o projeto e testes de um sistema computacional experimental de um relé de proteção. O relé foi instalado em uma subestação para proteção de distância de uma linha de transmissão de 230 kV. Ao contrário da proposta de Mann & Morrison, o algoritmo propõe a estimação fasorial por meio da primeira e segunda derivada do sinal, reduzindo a sensibilidade da componente DC de decaimento ex-

ponencial. O relé demonstrou um desempenho satisfatório em termos de tempo de atuação, variando entre um quarto de ciclo e três ciclos, a depender da localização da falta (ROCKEFELLER; UDREN, 1972).

No decorrer da década de 70, a evolução em desempenho e redução de custos dos microprocessadores alavancou pesquisas e implementações de relés de proteção nessa nova arquitetura (RUMMER; KEZUNOVIC, 1980). Em 1978, Rummer & Kezunovic apresentaram um conceito para a implementação de sistemas de proteção em microprocessadores baseado na hierarquização da distribuição de processamento em rede. O propósito era que o sistema fosse genérico e flexível para ser aplicável para vários tipos de proteção (RUMMER; KEZUNOVIC, 1978). Em 1980, Schweitzer & Aliaga apresentaram a implementação de um relé de proteção de sobrecorrente em um microprocessador. O relé permite ajustes da característica de operação, funções de medição e proteção simultânea de até cinco entradas sem necessidade de modificação de sua arquitetura (SCHWEITZER; ALIAGA, 1980).

Os primeiros relés microprocessados, embora ainda projetados com uma única função de proteção (assim como os eletromecânicos), possuíam benefícios adicionais como custo, ajustes mais sensíveis, seleção de múltiplas curvas para temporização, medição, comunicação, gravação de oscilografias, sequencial de eventos e a introdução de múltiplos grupos de ajustes (SCHWEITZER; ALIAGA, 1980; TZIOUVARAS; HAWBAKER, 1990), (BENMOUYAL, 1991). Com a contínua evolução dos microprocessadores em capacidade de processamento, fabricantes passaram a adotar a filosofia multifunção dos relés atuais, sendo um relé projetado com múltiplas funções de proteção específicas para uma dada aplicação de proteção (SACHDEV; ADU, 1992; YALLA, 1992), (WERSTIUK, 2007). Além disso, também intensificou-se o uso da comunicação para sistemas de proteção e controle com o uso de fibra óptica, rádio, interação com SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) e sincronização via GPS (*Global Positioning System*) (KOBAYASHI *et al.*, 1990; SACHDEV; ADU, 1992; BALL *et al.*, 1993).

Esse contexto de proliferação de dispositivos de proteção, aquisição, controle e simulação digitalizados causou interesse e acúmulo por dados e registros transitórios. Porém, até então não existia formato padrão para geração, armazenamento e transmissão desses registros, sendo necessário o usuário lidar com diferenças existentes na estrutura desses registros gerados por fabricantes diferentes. Dessa maneira, criou-se um padrão para armazenar esses dados em um

conjunto de arquivos chamado *Common Format for Transient Data Exchange* (COMTRADE) tendo sua primeira edição em 1991 (IEEE, 1991).

2.2 EVOLUÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE TESTE

A evolução dos relés também acarretou em mudanças na classificação de testes e suas aplicabilidades. Em geral, teste com relés eletromecânicos, principalmente devido ao princípio de operação baseado em componentes mecânicos e magnetismo, concentravam-se em verificar se estavam funcionando dentro de um limiar de tolerância. Caso negativo, partes individuais do relé como resistores, capacitores, ímãs e conexões eram ajustadas até que fosse atingido um nível desejado de tolerância (WERSTIUK, 2007). Porém com a introdução dos relés microprocessados ficou claro que algumas práticas novas poderiam e deveriam ser adotadas, uma vez que, por serem dispositivos totalmente eletrônicos, não possuíam as mesmas limitações dos eletromecânicos. Aos poucos, o interesse em testes em dispositivos reais foi além de verificações de funcionamento de componentes e mais afundo em estudos de proteção.

Os primeiros simuladores digitais foram desenvolvidos a partir da demanda de teste dos algoritmos dos novos relés numéricos microprocessados, visto que a metodologia antiga de testes, por meio de reprodução de estados baseado na geração de sinais sintéticos sem preocupação evidente em fidelidade na representação do transitórios entre os estados, se mostrava limitada por ser incapaz de reproduzir a natureza transitória de eventos de sistemas de potência reais. Por serem mais rápidos, os relés microprocessados, podem também atuar analisando transitórios ao invés de operar sempre baseado em regime permanente como os eletromecânicos (ALEXANDER; ANDRICHAK, 1990). Embora esse método de teste de estados tenha sua atratividade em determinadas situações, existem casos como a adequabilidade de um relé para uma aplicação e análise de uma atuação incorreta que exigem avaliações mais complexas que considerem o período transitório dos sinais (KEZUNOVIC; GALIJASEVIC, 1998).

Em 1990, Kezunovic *et al.* apresentaram a proposta de um simulador principalmente voltado para avaliações e comparações de desempenho de algoritmos por meio de testes com sinais transitórios (KEZUNOVIC *et al.*, 1990). De modo geral, a arquitetura do simulador é formado por três subsistemas: geração de arquivos com dados de falta, reconstrução e amplificação de sinais

analógicos. Os arquivos para teste poderiam ser obtidos por simulações de sistemas modelados em *software* do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) ou proveniente de dados reais gravados em RDP (Registadores Digitais de Perturbação). Antes de reconstruir o sinal analógico, o simulador converte a frequência de amostragem do sinal digital para 16 kHz, visto a frequência de amostragem pode variar entre fabricantes. O sinal digital reamostrado é reconstruído por um DAC (*Digital to Analog Converter*) e o sinal analógico resultante é amplificado em níveis adequados para o relé de proteção. A reconstrução e amplificação são necessárias visto que os relés recebem os sinais de teste nos mesmos terminais em que transformadores para instrumento são conectados na aplicação real.

A maioria dos trabalhos relacionados à implementação de testadores de relés de proteção, até o momento, abordavam sistemas em malha aberta. O principal aspecto desse tipo de sistema é que não existe integração em tempo real entre o simulador e o relé em teste. Em 1991, McLaren *et al.* apresentaram o desenvolvimento de um simulador em tempo real que permite interação direta dos comandos de abertura do relé com os disjuntores modelados na simulação em curso. Os passos de tempo da simulação atingíveis pelo sistema são da ordem de 100 μ s, tornando o sistema implementado capaz de realizar estudos de transitórios eletromagnéticos (MCLAREN *et al.*, 1991).

Com o aumento de complexidade dos relés sendo projetados como multifunções, lógicas programáveis, intenso uso de comunicação e esquemas de teleproteção, testadores passaram a suportar rotinas automáticas de testes, assistência por computadores e sincronização via GPS (JODICE; HARPHAM, 1994; APOSTOLOV; VANDIVER, 2001; SCHILLECI *et al.*, 2001). Além disso, com a crescente temática de digitalização de subestações, padronizada pela norma IEC 61850, fabricantes também implementaram protocolos como GOOSE e *Sampled Values* em testadores (IEC, 2003; APOSTOLOV; VANDIVER, 2004).

2.3 SITUAÇÃO ATUAL DOS DISPOSITIVOS DE TESTE

Até o momento, não existiam preocupações com limitação de bandas de amplificadores e testadores, uma vez que a ordem de dezenas de *kilohertz* atendiam a fidelidade transitória para os relés fasoriais. Porém, a estreia de um relé no domínio do tempo SEL-T400L pela *Schweitzer*

Engineering Laboratories, que utiliza unicamente algoritmos de proteção baseado em grandezas incrementais e ondas viajantes (SCHWEITZER *et al.*, 2016), trouxe novos desafios com relação a testes em relés de proteção, analogamente à introdução dos primeiros relés microprocessados. Enquanto amplificadores e testadores atuais reproduzem por volta de $0,25 \text{ A}/\mu\text{s}$, um distúrbio real é da ordem de $1 \text{ A}/\mu\text{s}$, de modo que os equipamentos atuais não têm banda suficiente para reproduzir os sinais com a fidelidade necessária para testar um relé baseado em ondas viajantes (GUZMÁN *et al.*, 2018b).

Por outro lado, além de requisitos de banda dos amplificadores, as simulações, no caso de sinais provenientes de *software* do tipo EMTP, necessitam que o passo de simulação seja da ordem de microssegundos. Ademais, a modelagem da linha de transmissão também deve ser adequada para reproduzir o transitório de uma forma realística (HENSLER *et al.*, 2017). Embora a capacidade computacional e modelos de linha de transmissão adequados estejam presentes, inclusive em simuladores em tempo real ^{1 2}, o limite continua na reprodução dos sinais nos terminais do relé (MARTI, 1982).

Tanto arquivos provenientes de *software* do tipo EMTP ou de simulações em tempo real precisam de um DAC e um amplificador para conseguir reproduzir os sinais em alta potência nos terminais do relé. Porém, como supracitado, não existe equipamento no mercado que consiga amplificar nem reproduzir com a fidelidade necessária. Normalmente existe uma outra opção, principalmente válida no caso de simuladores em tempo real, que é usar uma interface de teste dentro do próprio relé que aceita sinais em baixa potência e ignora as entradas convencionais. Existem DAC com a banda necessária para reproduzir os sinais em baixa potência ^{3 4}, porém o relé SEL-T400L não possui interface de teste, sendo necessário um relé inteiramente novo adaptado para sinais em baixa potência apenas para teste. Como resultado, além do custo elevado de um simulador em tempo real capaz de executar a simulação no passo de cálculo adequado não bastará adquirir apenas o relé que irá para campo e também usá-lo para teste, sendo necessário outro relé adaptado para realizar testes.

As limitações impostas levaram o fabricante do próprio relé a desenvolver um dispositivo

¹Informação extraída de <https://www.rtds.com/technology/simulation-hardware/>

²Informação extraída de <https://www.opal-rt.com/simulator-platform-op4510/>

³Informação extraída de <https://wiki.opal-rt.com/display/HDGD/OP5330+-+16+Analog+Output+-+1MSPS>

⁴Informação extraída de <https://knowledge.rtds.com/hc/en-us/articles/360034281234-GTIO-Cards>

unicamente para testar ondas viajantes ⁵. Embora esse equipamento seja capaz de cumprir com os requisitos impostos por ondas viajantes, o mesmo produz pulsos simulando a ocorrência de uma falta sendo ajustável ao tamanho da linha, tempo de trânsito, tipo e localização da falta (GUZMÁN *et al.*, 2018b). Dessa maneira, além de não ser possível testar elementos incrementais em conjunto, os pulsos não representam condições reais de falta, limitando-se a verificações voltadas para comissionamento e manutenção (IEEE, 2009).

Fabricantes de testadores de amplificadores também tem procurado soluções para viabilizar o teste de funções implementadas no domínio do tempo. Uma solução encontrada até o momento é a sobreposição de pulsos de um testador com a reprodução transitória de um amplificador com banda convencional (HENSLER *et al.*, 2017), (GUZMÁN *et al.*, 2018b) ⁶ ⁷. Essa solução é capaz de testar, em conjunto, tanto elementos incrementais quanto por ondas viajantes. Contudo, os problemas de fidelidade da reprodução das ondas continua, uma vez que em uma condição realista de falta as ondas viajantes medidas não se restringem unicamente ao instante de chegada das ondas viajantes. As ondas viajantes têm amplitudes e polaridades dadas pelos próprios parâmetros do sistema, instante de ocorrência da falta, possíveis reflexões e transmissões (GUZMÁN *et al.*, 2018b). Além disso, esse esquema de teste ainda limita-se apenas a reprodução das duas primeiras ondas incidentes (GUZMÁN *et al.*, 2018b; HENSLER *et al.*, 2017).

Nesse contexto, em 2018, foi introduzida uma funcionalidade no relé SEL-T400L capaz de receber e executar arquivos de teste internamente, logo, facilitando avaliações de registro do próprio relé ou de simulações como de *software* do tipo EMTP (GUZMÁN *et al.*, 2018b). Porém, essa metodologia exige que os arquivos COMTRADE sejam convertidos em um formato específico antes de ser enviado para o relé, sendo tanto o processo de geração do arquivo quanto envio para o relé dependentes do usuário. Devido ao procedimento manual e repetitivo, a metodologia é viável apenas para testes de casos isolados, inviabilizando, assim, uma análise de aplicabilidade e avaliação de desempenho do relé em um dado sistema em que inúmeros eventos são gerados variando diversos parâmetros do sistema (IEEE, 2009).

⁵Informação extraída de <https://selinc.com/products/T4287/>

⁶Informação extraída de <https://www.omicronenergy.com/en/products/cmc-356/>

⁷Informação extraída de <https://www.omicronenergy.com/en/products/twx1/>

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados brevemente conceitos sobre ondas viajantes e elementos incrementais com a finalidade de contextualizar princípios básicos de funcionamento de funções de proteção disponíveis no relé SEL-T400L. Além disso, apresentam-se também informações sobre a metodologia de teste aplicada pelo relé, cujo entendimento e otimização é foco deste trabalho. Assim, as lógicas de funcionamento das funções de proteção do SEL T400L não serão detalhadas, muito embora referências correlatas e alguns conceitos mais relevantes para o entendimento da solução desenvolvida sejam apresentados ao longo dos capítulos.

3.1 DISTÚRBIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Distúrbios ocorrem constantemente no sistema elétrico. Contudo, linhas de transmissão, principalmente devido à sua extensão, são os equipamentos mais expostos (PAITHANKAR; BHIDE, 2011). De fato, no período de 1º de julho de 2016 até 30 de junho de 2017, foram constatados um total de 3570 desligamentos forçados na rede básica do SIN, sendo 76% ocorrências em linhas de transmissão (ANEEL, 2018). Embora existam diversos tipos de distúrbios como chaveamentos e descargas atmosféricas, os curtos-circuitos normalmente são os mais preocupantes, pois além de causarem desligamentos não-programados implicam em risco à integridade dos equipamentos e à estabilidade do sistema (ANDERSON; FOUAD, 2008).

Nesse contexto, é fundamental que os sistemas de proteção sejam capazes de eliminar curtos-circuitos rapidamente, já que o tempo de eliminação da falta está diretamente relacionado ao desgaste de equipamentos, à estabilidade do sistema e, conseqüentemente, ao limite de potência transmitida (EASTVEDT, 1976). Por outro lado, a maioria dos elementos tradicionais, por serem baseados em componentes fundamentais, necessitam, tipicamente, de um ciclo para ter uma medição fasorial confiável. Conseqüentemente, para reduzir o tempo de eliminação de

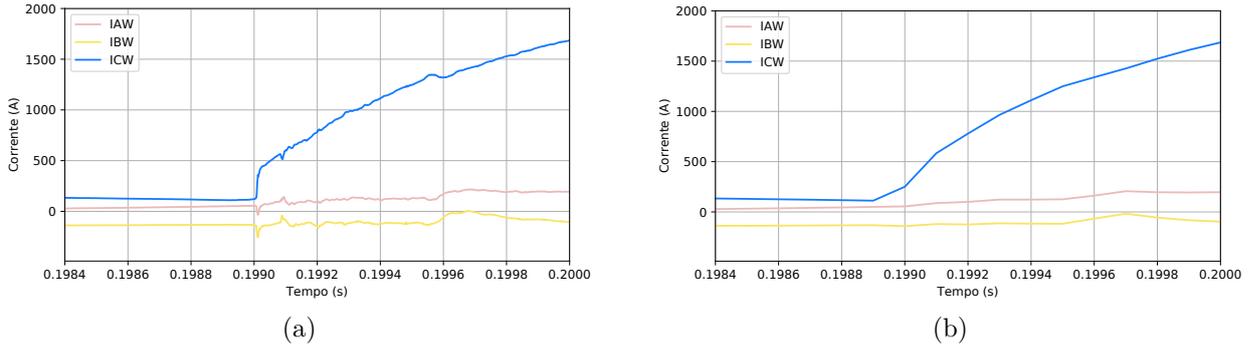


Figura 3.1. Momento de inserção da falta em uma oscilografia de um curto-circuito real com diferentes taxas de amostragem (a) 1 MHz (b) 10 kHz.

faltas, é essencial que sejam empregadas componentes transitórias ao invés de fundamentais (SCHWEITZER *et al.*, 2015). A Figura 3.1 ilustra a diferença de informação presente no transitório de um evento real capturado em duas taxas de amostragem diferentes, ilustrando a perda de informação transitória quando do uso de taxas menores.

Como as variações no comportamento do sinal possuem informações relacionadas ao distúrbio, é possível extrair as informações presentes nesses transitórios e empregá-las em classificação, detecção, localização de faltas e até mesmo em aplicações em tempo real como proteção (GREENWOOD, 1991; DOMMEL, 1978). Embora o desafio, até então, era implementar essas funções em dispositivos de uma forma eficiente do ponto de vista econômico, os avanços computacionais dos últimos anos já eliminaram essas barreiras (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS VIAJANTES

Ondas viajantes são lançadas e se propagam em linhas de transmissão devido à variações repentinas na tensão, sendo causadas por fenômenos como curtos-circuitos, chaveamentos e descargas atmosféricas (BEWLEY, 1931). No ponto do distúrbio, a onda lançada é vista praticamente como um degrau em consequência da variação abrupta, tendo sua amplitude dada pela diferença em amplitude de tensão antes e depois da ocorrência do distúrbio (JOHNS; SALMAN, 1995). Em uma falta franca, como a tensão após a aplicação da falta cairá para zero, a amplitude da onda lançada será igual à amplitude da tensão no instante imediatamente anterior à inserção da perturbação no sistema. A propagação de ondas viajantes em uma linha de transmissão, lançadas após a ocorrência de uma falta, é mostrada na Figura 3.2.

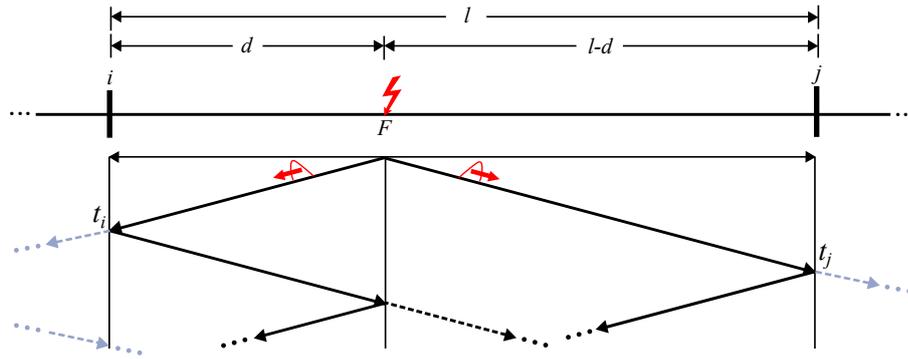


Figura 3.2. Diagrama de propagação para uma linha de transmissão de dois terminais.

Em linhas de transmissão aéreas ideais, sem perdas, a velocidade de propagação da onda é constante, sendo próxima da velocidade da luz, e não existe atenuação da onda. Contudo, em uma linha de transmissão aérea real, há atenuação à medida que a onda se propaga, a velocidade de propagação varia de acordo com as frequências dos transitórios. Se a onda for imaginada como um degrau ideal no domínio do tempo, sua decomposição no domínio da frequência seria formada por um espectro infinito de frequência, tendo cada componente uma velocidade diferente. Por essa razão que o formato de uma onda real medida, como ilustrado na Figura 3.1(a), tem uma aparência mais dispersa (SCHWEITZER *et al.*, 2014). Vale ressaltar também que no caso de ocorrência de uma falta não franca, a resistência de falta impactará na amplitude da onda lançada, sendo que quanto maior a resistência de falta, menor será a queda de tensão, logo resultando em uma menor amplitude da onda lançada.

Ao atingirem a discontinuidade presente nos terminais da linha de transmissão, assim como também apresentado na Figura 3.2, parte da onda incidente é transmitida e o restante é refletida. Os respectivos valores de amplitude e polaridade das ondas resultantes dependem da relação entre a impedância característica da própria linha de transmissão e do componente adjacente à linha (GREENWOOD, 1991). Assim como ondas lançadas por uma falta interna alcançam linhas adjacentes, ondas originadas de eventos externos também podem atingir a linha protegida.

3.3 GRANDEZAS INCREMENTAIS

O teorema da sobreposição define que, para um sistema linear, a resposta causada por múltiplos estímulos é igual a soma das respostas causadas individualmente por cada estímulo

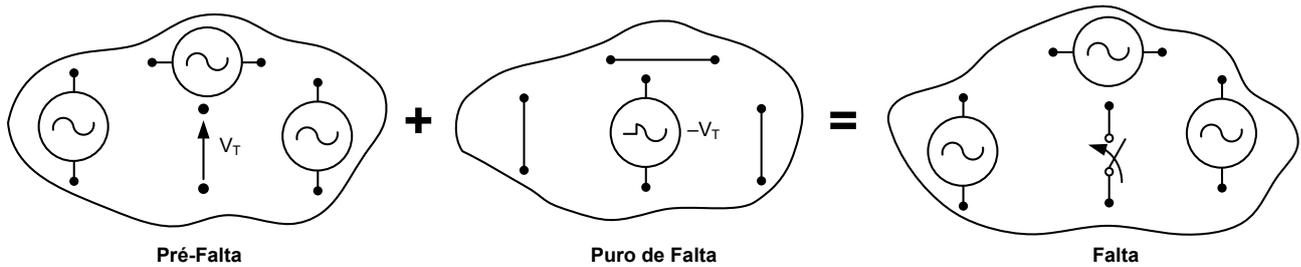


Figura 3.3. Teorema da sobreposição (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

(PITT, 1977). Portanto, em circuitos elétricos formados por elementos lineares, corrente e tensão em qualquer ponto do circuito são iguais ao somatório das contribuições individuais de cada fonte (DESOER, 2010). De forma similar, uma rede sob falta pode ser formada pela combinação de uma rede de pré-falta, constituída pelo regime permanente de pré-falta dos sinais de corrente e tensão, e uma rede puramente de falta, que contém unicamente os sinais de corrente e tensão gerados pela falta (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

As grandezas incrementais, por serem baseadas em componentes do circuito puro de falta, dependem apenas de parâmetros da rede e, portanto, independem de condições de pré-falta. Seguindo o teorema da sobreposição, as grandezas do circuito puro de falta podem ser obtidas subtraindo sinais de pré-falta dos de falta assim como mostrado na Figura 3.3. De fato, o relé medirá na prática sinais de tensão e corrente na pré-falta e, após a ocorrência de um curto-circuito, medirá a sobreposição da pré-falta com puro de falta de modo que as grandezas incrementais podem ser calculadas com a seguinte formulação (SCHWEITZER *et al.*, 2015):

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

em que Δs é a grandeza incremental, s é o sinal medido, T é o período do sinal fundamental e p é a quantidade arbitrária de ciclos que se deseja utilizar no elemento incremental. Essa relação, por outro lado, é válida por apenas alguns milissegundos, visto que as fontes reagem devido à inserção do distúrbio no sistema (SCHWEITZER *et al.*, 2015). Como a implementação desse tipo de elemento incremental é realizada a partir do armazenamento de valores na memória igual à quantidade de ciclos p , o elemento é invalidado após esse período (HENSLENER *et al.*, 2017), bloqueando suas funções.

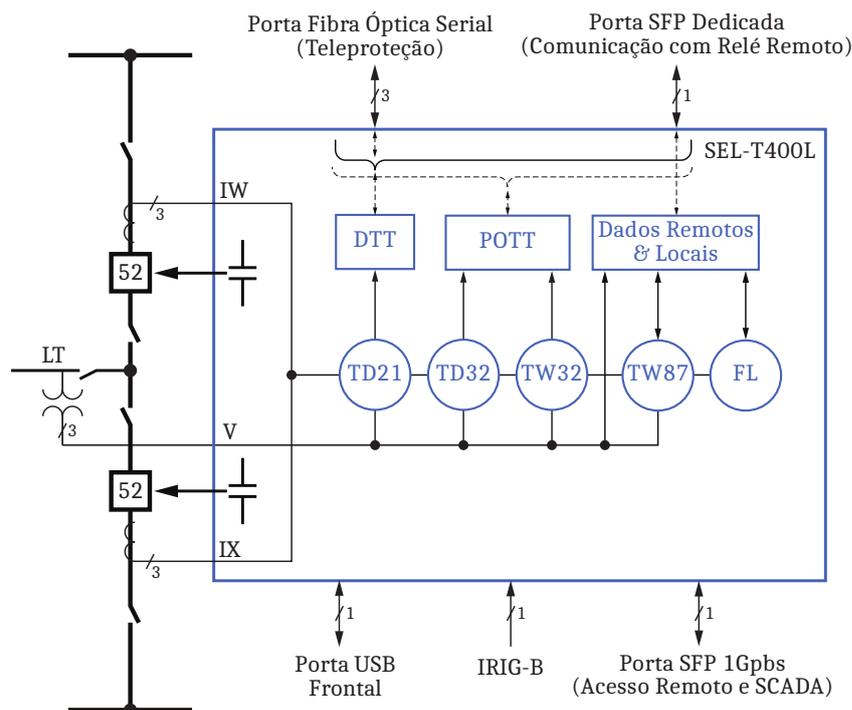


Figura 3.4. Resumo dos esquemas de proteção do relé SEL-T400L (SEL, 2020).

3.4 RELÉ SEL-T400L

O relé SEL-T400L foi desenvolvido não como um substituto dos relés convencionais que empregam componentes fundamentais, mas sim como um dispositivo complementar, capaz de atuar mais rapidamente para faltas críticas, com maior nível de curto-circuito. A redução do tempo de atuação, e portanto no tempo de extinção da falta, trás benefícios em termos de estabilidade do sistema e redução de danos em equipamentos. Para tanto, o dispositivo emprega unicamente elementos de proteção no domínio do tempo baseados em ondas viajantes e grandezas incrementais (SCHWEITZER *et al.*, 2015; SEL, 2020). A Figura 3.4 mostra um resumo do esquema de proteção contido no relé.

Os elementos incrementais presentes no relé são compostos por um elemento de distância (TD21) e outro direcional (TD32). Assim como elementos tradicionais de distância, a TD21 é sensibilizada de acordo com uma zona de alcance ajustada, não atuando para faltas fora dessa zona. Portanto, a TD21, assim como a função tradicional de distância, pode atuar isoladamente de outros terminais da linha de transmissão ou utilizando um esquema de proteção via *Direct Transfer Trip* (DTT). Por outro lado, a TD32 opera em unicamente em um sistema de teleproteção via *Permissive Overreach Transfer Trip* (POTT), uma vez que, similarmente

Tabela 3.1. Resumo das funções de proteção, ajustes e aplicações (HENSLER *et al.*, 2017),(SEL, 2020).

Tipo	Elemento	Ajuste	Descrição	Aplicação	Tempo*
Incremental	TD21	TD21MP	Alcance do elemento de distância de fase	Elemento de subalcance independente de canal de comunicação	2-7 ms
		TD21MG	Alcance do elemento de distância de terra		
	TD32	TD32ZF	Limiar de impedância direta	Elemento de sobrealcance operando em conjunto com um esquema de teleproteção POTT	1-3 ms
		TD32ZR	Limiar de impedância reversa		
Onda Viajante	TW32	ETW32	Habilitar permissivo pela TW32	Aceleração do esquema de teleproteção POTT	0.1 ms
	TW87	TP50P	Limiar de supervisão de sobrecorrente de fase	Esquema diferencial de ondas viajantes de corrente com comunicação dedicada entre os terminais da linha de transmissão	1-5 ms
		TP50G	Limiar de supervisão de sobrecorrente de terra		
		TWLPT	Tempo de propagação		

* Tempo de atuação típico de acordo com o fabricante (SEL, 2020).

a função direcional tradicional, é sensibilizada por faltas diretas, mesmo que estejam fora da linha de transmissão protegida (SCHWEITZER *et al.*, 2015; SEL, 2020).

Os elementos baseados em ondas viajantes são divididos em direcional (TW32) e diferencial (TW87). O objetivo da TW32 é atuar em conjunto da TD32 no esquema POTT com a finalidade de acelerar o tempo de atuação caso ondas viajantes sejam detectadas. Portanto, a TW32 também atua de forma dependente da comunicação com outros terminais da linha de transmissão, analisando a polaridade entre as primeiras ondas incidentes de tensão e corrente. A TW87, por outro lado, utiliza um canal dedicado para troca de informações em tempo real entre os terminais para identificar se uma falta é interna ou externa a partir da comparação entre as polaridades das primeiras ondas de corrente medidas em cada terminal. A Tabela 3.1 apresenta um sumário das funções dos relés, respectivos ajustes e aplicações. Vale ressaltar que o SEL-T400L também emprega ondas viajantes para localização de faltas por métodos de um e dois terminais (SCHWEITZER *et al.*, 2015; GUZMÁN *et al.*, 2018a; SEL, 2020).

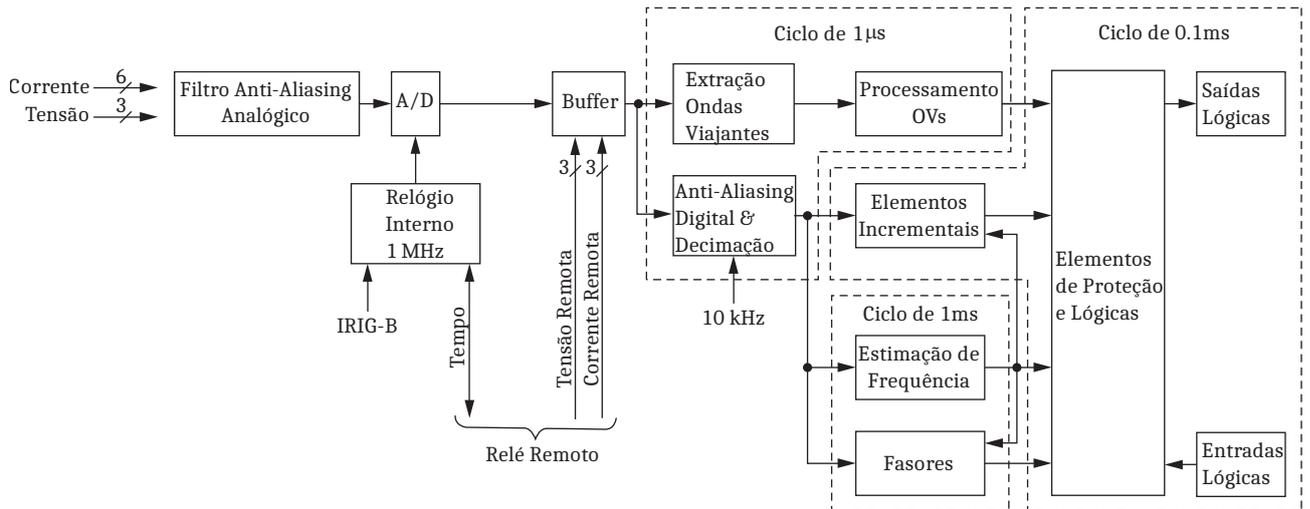


Figura 3.5. Diagrama de processamento interno do relé SEL-T400L (SEL, 2020).

3.4.1 Processamento Interno

A penalidade do emprego dos fundamentos do domínio do tempo está na maior demanda computacional exigida comparada com elementos baseados em componentes fundamentais. Não são necessários apenas conversores A/D com amostragem da ordem de megahertz com resolução adequada, mas também banda de pelo menos 100 Mbps, sincronização com precisão de 100 ns ou melhor e capacidade computacional da ordem de giga multiplicações por segundo (SCHWEITZER *et al.*, 2015; GUZMÁN *et al.*, 2018b). Além disso, no caso de um dispositivo real, também têm que ser mantidas funcionalidades como medição, localização de faltas, armazenamento de registros, funções supervisórias em conjunto com múltiplos elementos de proteção executando paralelamente em tempo real (SEL, 2020). O diagrama do referido processamento interno é apresentado na Figura 3.5.

No caso do SEL-T400L, os sinais de corrente e tensão provenientes de transformadores para instrumentos são filtrados por um filtro *anti-aliasing* analógico com frequência de corte de aproximadamente 400 kHz. Os sinais filtrados são amostrados por conversores A/D de 18 *bits* a cada 1 μ s, sincronizado com o relógio interno que é alinhado com uma referência externa de tempo, conferindo o mínimo de 100 ns de precisão. Esse sincronismo externo pode vir tanto de um fonte de tempo via IRIG-B ou por meio de uma conexão dedicada com um SEL-T400L remoto. Vale ressaltar também que a TW87 e localização de faltas por dois terminais são apenas ativadas se esse canal com o relé remoto estiver ativo, já que as amostras de corrente e

tensão são compartilhadas entre os relés do esquema para cálculo dessas funções. Com relação as medições do relé, destaca-se a existência de 6 canais de corrente (2 conjuntos trifásicos) com a finalidade de atender arranjos de subestação com dois disjuntores como anel e disjuntor e meio (SEL, 2020).

No intervalo de processamento de $1 \mu\text{s}$, o relé extrai e processa ondas viajantes dos sinais de tensão e corrente amostrado. A extração é feita a partir de um filtro denominado *differentiator smoother*, obtendo dados como amplitude e instante de chegada da onda (ANDO *et al.*, 1985b), (ANDO *et al.*, 1985a). Essas informações são empregadas no detector de distúrbio por ondas viajantes, elementos de proteção TW87 e TW32, localizador de falta e no monitoramento de interferência eletromagnética (SEL, 2020). Nesse mesmo intervalo de $1 \mu\text{s}$, as amostras dos sinais de corrente e tensão também são pré-processadas (subamostragem e filtragem) para serem aplicadas nos elementos incrementais. A fim de eliminar os efeitos capacitivos nos sinais medidos e aproximar o comportamento de um circuito composto apenas por resistências e indutâncias, o relé limita o espectro dos sinais aplicados para grandezas incrementais em algumas centenas de hertz. Os elementos incrementais são então processados a cada 0,1 ms respondendo a variações incrementais nas amostras atuais comparadas com um ciclo atrasadas. Por fim, o relé processa a lógica interna de proteção, verifica entradas lógicas e atualiza suas saídas lógicas a cada 0,1 ms. Adicionalmente o relé também utiliza estimação de fasores e de frequência para funções auxiliares e medição, tal como funções de ativação do relé e localização de faltas (SEL, 2020).

3.5 TESTES E COMISSONAMENTO

A maioria dos sistemas de proteção são instalados para lidar com eventos raros e críticos, necessitando, para tanto, funcionamento e concepção ótimos a fim de isolar o defeito e afetar minimamente o resto do sistema. Por outro lado, dados provenientes de operação normal do dispositivo em campo não são suficientes para observar se o mesmo está preparado para lidar com tais eventos críticos e nem corrigir possíveis problemas caso existam. Portanto, sistemas de proteção necessitam ser extensivamente testados, inclusive com eventos mais realistas possíveis para determinar se o esquema está ou não adequado para a aplicação e corrigir erros, caso existam, antes da própria instalação e operação (IEEE, 2009).

Tipicamente, testes de dispositivos e esquemas de proteção em sistemas elétricos são conduzidos por reprodução de sinais secundários realistas ou sintéticos, em níveis apropriados, nos terminais dos dispositivos no esquema, simulando de fato como ocorre com o relé em funcionamento que recebe corrente e tensão de transformadores para instrumento. As seguintes metodologias são as formas mais comuns de reprodução de sinais em relés de proteção (IEEE, 2009):

Simulação de sinais sintéticos: Sinais senoidais gerados por testadores convencionais com controle de amplitude, fase e frequência. Normalmente são usados diferentes estados (pré-falta, falta e pós-falta) com tempo de transição ajustável entre os estados.

Simulação de arquivos COMTRADE: Reprodução de sinais provenientes de simulações do tipo EMTP ou de oscilografias reais. Tradicionalmente, testadores que possuem essa funcionalidade, também são capazes de reproduzir sinais sintéticos. Ademais, esses testes são popularmente chamados de *playback* por reproduzirem eventos que já ocorreram.

Simulação em tempo real: A reprodução dos sinais ocorre simultaneamente com a simulação de um sistema modelado em um programa do tipo EMTP. As saídas do dispositivo de proteção sob teste pode ser usada para interagir com a simulação. Amplificação dos sinais ou relé com interface de teste pode ser necessária, já que o usual é que os sinais gerados sejam de baixa potência, ao contrário dos equipamentos utilizados nas simulações anteriores.

Por outro lado, existem testes para diferentes propósitos e, conseqüentemente, com diferentes requisitos. Portanto, algumas metodologias são mais apropriadas dependendo do objetivo. De acordo com as orientações da norma IEEE C37.233 os testes podem ser classificados em (IEEE, 2009):

Certificação: Verificar projeto e desempenho do dispositivo de proteção sob diversas condições de operação frente a especificações predefinidas. Essa verificação normalmente inclui testes padronizados para determinar se as funcionalidades do relé operam de acordo com o desempenho esperado e também sob condições ambientais especificadas. Os testes voltados para desempenho do dispositivo, embora possam empregar arquivos de simulações do

tipo EMTP, normalmente concentram em modelagens mais simples do sistema elétrico para que o resultado não seja específico a uma aplicação e, portanto, seja do interesse de um maior número de usuários.

Aplicação: Determinar a adequação de um dispositivo ou esquema de proteção em uma aplicação específica. Para tanto, tipicamente esse tipo de teste utiliza simulações do tipo EMTP incluindo uma modelagem realista do sistema específico e uma quantidade elevada de cenários testados com a finalidade de verificar o desempenho do relé mais próximo possível do que seria na realidade. Vale ressaltar que o resultado de testes de aplicação podem ser aproveitados para determinar ou confirmar ajustes apropriados para o dispositivo.

Comissionamento: Avaliar se o sistema de proteção está instalado corretamente e se está funcionando como esperado. Nesse tipo de teste o foco está mais na verificação da instalação, conexão e interação com outros equipamentos do que na avaliação extensiva dos elementos de proteção. Dessa maneira, não há o mesmo requisito de realismo exigido em testes de certificação e aplicação. Conseqüentemente, os testes são conduzidos a partir de reprodução de sinais sintéticos, sendo normalmente suficiente para verificar se o sistema de proteção está funcionando como esperado.

Manutenção: Verificar se o esquema de proteção continua operando da forma que foi projetado e instalado inicialmente. Além de um teste geral no esquema de proteção, também são realizados testes de calibração para identificar possíveis componentes que estejam funcionando fora de limiares apropriados de operação. Atualmente, existem relés microprocessados que possuem rotinas de auto-monitoramento que enviam alarmes para o sistema de supervisão e controle caso algum teste apresente alguma falha.

De modo geral, testes de certificação e aplicação demandam tradicionalmente sinais realistas, e também uma grande variedade de eventos variando diversas condições de operação e de falta para, de fato, verificar e avaliar o desempenho do dispositivo. Conseqüentemente é mais comum, no caso desses testes, utilizar simulações em tempo real e arquivos COMTRADE com sinais resultantes de programas do tipo EMTP com modelagem adequada do sistema em estudo. Contudo, testes de manutenção e comissionamento, embora também possam usar registros mais realistas, não têm foco na verificação do desempenho do dispositivo, mas sim se este

está e continua instalado corretamente, respondendo para faltas internas dentro dos limites parametrizados e interagindo corretamente com outros equipamentos do esquema de proteção. Assim, simulações com sinais sintéticos são mais comuns em comissionamento e manutenção.

3.5.1 Desafios Atuais

Como ilustrado pelas classificações da norma IEEE C37.233, a fidelidade dos sinais depende do tipo de verificação desejada. Contudo, cada esquema de proteção possui requisitos mínimos inerentes aos dispositivos que fazem parte do mesmo. Relés microprocessados tradicionais disponíveis comercialmente usualmente não ultrapassam resolução de 32 amostras por ciclo, o que resultaria em um potencial espectro efetivo de até 960 Hz de acordo com o Teorema da Amostragem, após limitação de banda na frequência de Nyquist (KEZUNOVIC *et al.*, 2016).

Outro aspecto relevante é como o relé de proteção recebe os sinais para teste. Tradicionalmente, os sinais são reproduzidos nos próprios terminais dos relés, os mesmos onde os transformadores para instrumentos são conectados. Vale ressaltar que, em relés já instalados em campo, são previstas chaves de manobra de *bypass* nos transformadores para instrumento que permitem expor os terminais dos relés a sinais externos.

Alguns relés também possuem interfaces de testes de baixa potência, porém, normalmente, é necessário abrir o dispositivo para acessar essa interface, não sendo apropriado para relés já instalados e em operação em campo. Esse tipo de interação com o relé é mais comum em simuladores em tempo real e, conseqüentemente, mais apropriado para testes antes da instalação do dispositivo em campo. Alternativamente, com a introdução da norma IEC 61850, já existem relés totalmente digitalizados, recebendo pacotes via rede com as medições já digitalizadas (IEC, 2003). Embora por um lado facilite testes em relés de proteção, já que remove a necessidade de equipamentos de teste para reproduzir sinais em alta potência com espectro adequado, a norma fixa em 80 amostras por ciclo para sinais de proteção. De fato, essa resolução ainda limita a implementação de algoritmos baseados em transitórios de mais alta frequência.

Nesse contexto, antes de realizar quaisquer testes em um relé de proteção, é crucial entender como testar o dispositivo de maneira que todas as suas funções sejam verificadas de acordo com o teste desejado. No caso do relé SEL-T400L, por não possuir interface de teste no

relé disponível comercialmente, as opções ficariam limitadas à reprodução direta de sinais nos terminais do relé. Contudo, ao observar as especificações de equipamentos de teste disponíveis na atualidade, nota-se que o espectro é limitado na ordem de alguns kilohertz (GUZMÁN *et al.*, 2018b). Embora seja mais do que suficiente para os relés tradicionais, até mesmo os com requisitos mais altos de 32 amostras por ciclo, essas soluções baseadas em amplificação estão distantes dos aproximados 400 kHz exigidos para testar o SEL-T400L por completo.

Alguns esforços de fabricantes têm sido direcionados para desenvolver equipamentos que atendam esses requisitos transitórios mais elevados. Porém, até o momento os resultados são equipamentos que reproduzem um número limitado de ondas viajantes isoladas ou sobrepostas a sinais fundamentais para testar a capacidade do relé em detectar faltas internas e externas. Contudo, tal metodologia não é suficiente para uma verificação realista de desempenho das funções do relé, visto que, na ocorrência de um distúrbio, os transitórios resultantes são dependentes de, por exemplo, parâmetros da rede elétrica, tipo de falta e terminações. Portanto, embora seja suficiente reproduzir algumas ondas em instantes específicos para teste de comissionamento e manutenção, não é suficiente para teste de certificação e aplicação em que é necessário de fato sinais realistas para entender como o relé se comportará ao ser instalado em campo (GUZMÁN *et al.*, 2018b).

3.5.2 SEL Digital Playback

Dadas as limitações para testes no SEL-T400L, o fabricante do dispositivo introduziu uma funcionalidade dentro da lógica do relé capaz de armazenar arquivos de teste, chamados arquivos *playback*, e trocar as medições de tensão e corrente analógicas do relé por sinais presentes nesses arquivos de teste. De fato, para as lógicas de proteção e outras funções do relé, é como se os sinais presentes no arquivo de teste fossem a saída do conversor A/D do relé. A Figura 3.6 apresenta, de forma geral, como funciona o processamento dos arquivos *playback* internamente no relé.

Cabe a lógica de controle de teste interna ao relé trocar a fonte de entrada de sinais para as lógicas de proteção e localização do relé de acordo com o comando de inicialização de teste do usuário. Essa lógica de controle também comanda a habitação da comunicação serial do relé

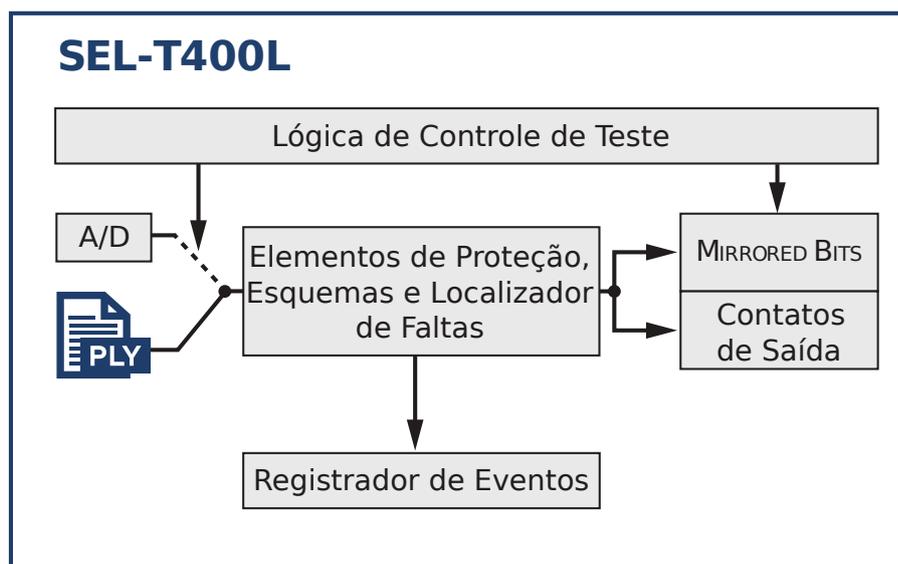


Figura 3.6. Lógica interna de teste (SEL, 2020).

com outros dispositivos (protocolos SEL MB8 ou IEEE C37.94), por exemplo para POTT, DTT, falha de disjuntor e religamento, e também se os contatos lógicos de saída estarão ativos. Vale ressaltar que são apenas sinais de corrente e tensão medidos que são substituídos pelo conteúdo do arquivo de teste, de modo que a substituição de sinais lógicos de contatos de entrada ou de comunicação não é suportada. De forma similar, amostras remotas recebidas para lógicas de proteção e localização de faltas por ondas viajantes também não são substituídas e continuam sendo recebidas. Portanto, em um esquema que envolva múltiplos relés, cada SEL-T400L deve receber arquivo e comando de teste apropriado para que os relés interajam entre si de fato como seria em um evento em campo. De modo geral, o teste se resume aos seguintes processos para cada relé:

- Geração de arquivo de teste.
- Envio do arquivo de teste para o relé.
- Comando para inicialização do teste.

3.5.2.1 Geração de Arquivos de Teste

Como o relé não aceita diretamente arquivos de teste no formato COMTRADE, o fabricante disponibiliza um programa em que um registro COMTRADE é carregado e, então, usado para gerar o arquivo *playback*. A Figura 3.7 apresenta a interface do programa fornecido pelo

fabricante para geração do arquivo *playback*. Em termos de conteúdo, os arquivos de teste, assim como as entradas físicas do relé, suportam um conjunto trifásico de tensão (V) e dois conjuntos trifásicos de corrente (IW e IX). Vale ressaltar que esses sinais contidos no arquivo *playback* devem ter níveis correspondentes a sinais secundários, respeitando as relações de transformação parametrizadas no relé.

3.5.2.2 Interação com o Relé

Com o arquivo de teste gerado, o procedimento seguinte é transferir esse arquivo para a memória do relé. O SEL-T400L suporta armazenar até 5 arquivos com no máximo 1,2 segundos. A transferência é normalmente conduzida por rede via *File Transfer Protocol* (FTP), sendo o procedimento realizado em um segundo programa responsável para interagir com o relé, mostrado na Figura 3.8. Vale ressaltar que o relé suporta apenas um cliente FTP, logo não é possível realizar múltiplas transferências simultâneas para o mesmo relé. Além disso, esse programa responsável pela comunicação com o relé não suporta múltiplas instâncias nem mais de uma conexão simultânea, portanto não é possível transferir para mais de um relé concomitantemente a partir de um mesmo computador.

O teste pode ser iniciado assim que a transferência para o relé é finalizada e o mesmo reconhece o arquivo. Para tanto, o usuário pode escolher duas formas de inicialização do

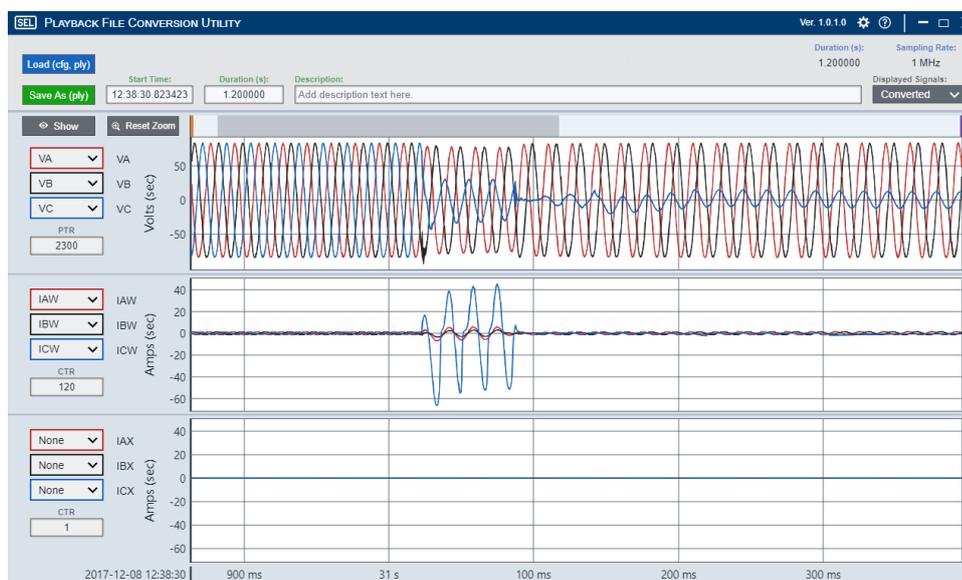


Figura 3.7. Programa padrão de geração do arquivo *playback*.

teste: manual ou agendado. Com o teste iniciado, a lógica de controle de teste copia os dados do arquivo playback indicado para a RAM (*Random Access Memory*) do relé, preparando a execução dos sinais. Se iniciado pelo modo manual, o teste será executado assim que essa transferência for concluída. Por outro lado, no caso de agendado, o teste será executado assim que o horário do relé atingir a hora agendada para o teste. Por segurança, antes de executar de fato um teste inicializado, o relé requer confirmação em seu painel frontal a fim de evitar problemas na realização de teste em relés em operação. Essa confirmação, caso feita, abre uma janela de uma hora para execução de testes sem necessidade de nova confirmação no dispositivo.

O modo agendado é disponibilizado apenas se existe uma fonte de tempo externa ou uma conexão com um relé remoto válida para sincronização. Portanto, esse é um tipo de inicialização voltado para testes que envolvem esquemas com mais de um SEL-T400L, já que é crucial garantir que os relés sob teste iniciem os testes no mesmo instante. Vale ressaltar que a lógica de controle de teste exige, obrigatoriamente, que o horário especificado, no caso de testes agendados, esteja no mínimo 2 minutos avançado com relação a hora interna do relé. Testes no modo agendado são os únicos capazes de verificar de fato o desempenho do relé como um todo, visto que a única função de proteção projetada para atuar sem canal de comunicação é a TD21. No entanto, pelos requisitos mencionados resulta em atividade demorada que requer atenção do usuário durante o processo.

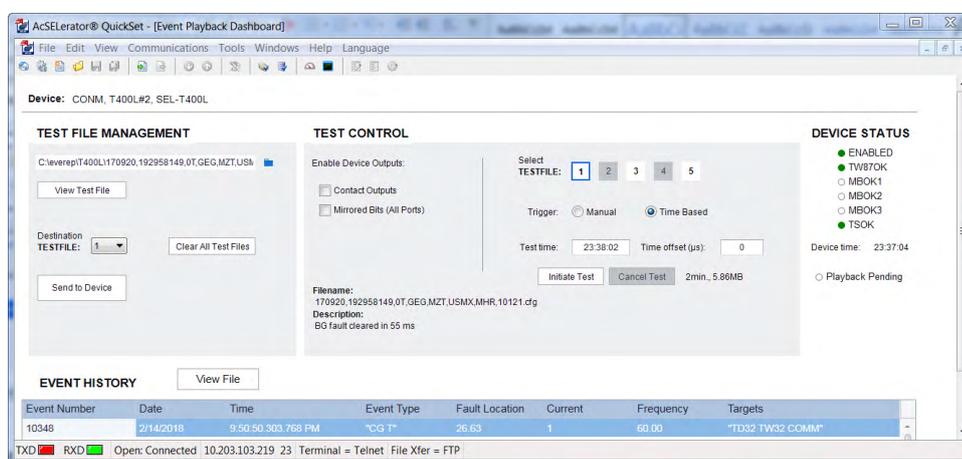


Figura 3.8. Programa padrão de interação com o relé (SEL, 2020).

3.5.2.3 Implicações

O fato do SEL-T400L receber arquivos com sinais de tensão e corrente já digitalizados solucionaria o problema de reprodução adequada de transitórios de outras metodologias de teste. Além disso, a parte de interação com o relé, conceitualmente, é similar a interação com um testador convencional que recebe arquivos COMTRADE, em que arquivos para testes são carregados em um programa que controla o equipamento e o usuário comanda a iniciação do teste. Por outro lado, alguns recursos cruciais nos testadores convencionais, como, por exemplo, reprodução sequencial de eventos, não estão presentes no esquema de teste do SEL-T400L. A Figura 3.9 apresenta uma visão geral do processo de teste no SEL-T400L.

A incompatibilidade do relé em aceitar, diretamente, arquivos COMTRADE implica em uma dificuldade adicional para preparativos anteriores ao teste. Não basta apenas obter arquivos COMTRADE, por exemplo no caso de eventos obtidos por meio de simulações do tipo EMTP, mas também esses arquivos devem ser convertidos individualmente para gerar os arquivos de teste compatíveis com o relé. Tal dificuldade é intensificada quando um esquema de proteção com mais de um relé está sob avaliação. Como resultado, os arquivos de teste tem que ser gerados separadamente para todos os relés no esquema de teste.

A capacidade de armazenamento de até 5 arquivos de teste, embora reduzida, não é um fator limitante relevante uma vez que os arquivos de teste teriam que ser transferidos pelo usuário individualmente de qualquer forma. Contudo, a lógica de controle de teste do relé carece

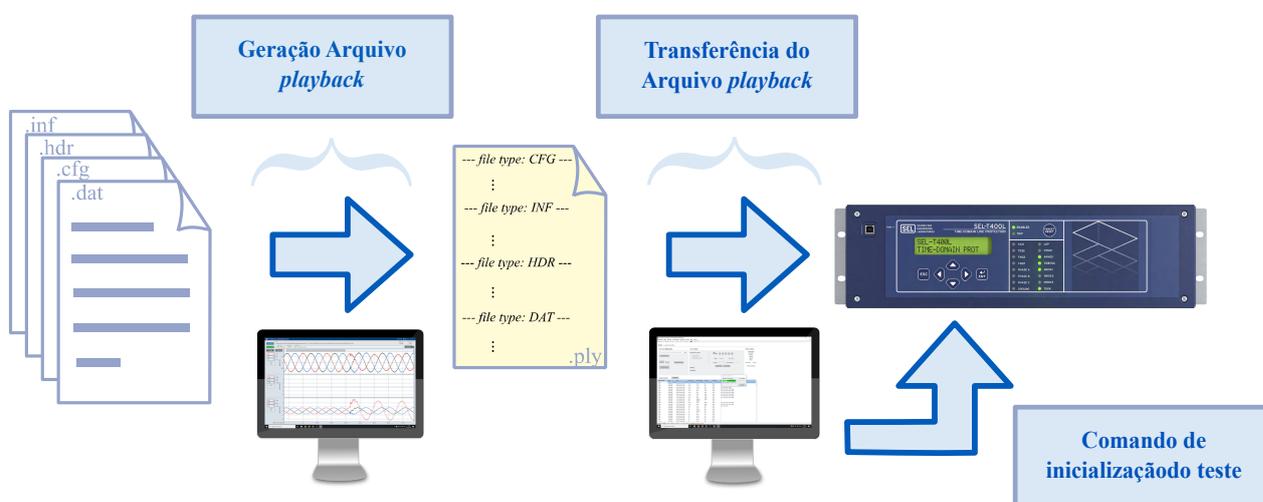


Figura 3.9. Procedimento padrão para realização do teste via arquivo *playback* em um único SEL-T400L a partir de arquivo COMTRADE.

de uma forma de executar todos os arquivos de teste, presentes na memória, de uma forma sequencial. De fato, em testadores convencionais e simuladores em tempo real, normalmente, existe tal funcionalidade que, ao ser comandado, executará todos os eventos especificados, inclusive para testes que precisam de referência externa de tempo. No caso do SEL-T400L não há tal funcionalidade, de modo que o usuário é obrigado a comandar ou indicar o momento de inicialização individualmente para cada arquivo de testes na memória do relé.

Com relação especificamente a esquemas de teste sincronizados com mais de um relé SEL-T400L operando, existem dificuldades adicionais principalmente na transferência de casos e comandos de inicialização do teste. O procedimento da Figura 3.9, além de repetido para todo relé do esquema, tem que ser feito um relé por vez, sem suporte para conexões simultâneas com mais de um relé, seja para transferência, ou inicialização de teste. Portanto, o usuário frequentemente encontra-se trocando de conexão entre os relés, primeiro para realizar transferências de arquivos em todos os relés e depois para agendar o início do teste. Vale ressaltar ainda que, embora não faça parte da lógica de teste, a aquisição de oscilografias também é de responsabilidade do usuário.

Como supracitado e ilustrado na Figura 3.9, a metodologia padrão de teste é intrinsecamente manual, dependente do usuário e, conseqüentemente, vulnerável a erros. É inteiramente de responsabilidade do usuário gerar os arquivos de teste apropriados, transferi-los para o relé e inicializar o teste da forma apropriada de acordo com o esquema a ser avaliado, repetidamente até que todos os casos desejados sejam avaliados. Conseqüentemente, embora a metodologia por um lado solucione os problemas de fidelidade e realismo demandado para teste de certificação e aplicação no SEL-T400L, por outro lado, introduz outros impeditivos para realização desses testes, uma vez que essas análises requisitam uma quantidade elevada de eventos avaliados (IEEE, 2009).

Neste capítulo é apresentada uma metodologia alternativa para testes no relé SEL-T400L. Assim como a original, é utilizada a funcionalidade do relé de receber e reproduzir sinais presentes em um arquivo de teste. Porém, o objetivo principal é, além de propor uma metodologia mais eficiente, suportar de fato verificações de certificação e aplicação que são inviáveis pela forma tradicional, incluindo também novos recursos.

4.1 VISÃO GERAL

A versão proposta do *Digital Playback* no SEL-T400L, desenvolvida em *Python*, tem a finalidade principal em adicionar suporte para testes extensivos no SEL-T400L. Para tanto, todos os processos apresentados na Figura 3.9 são automatizados e integrados. O foco principal no desenvolvimento foi a abstração de toda complexidade e lógica interna atribuída ao usuário pela metodologia original de teste. Dessa maneira, não há requisito de, separadamente, gerar arquivos de teste a partir de arquivos COMTRADE existentes nem qualquer interação direta com o relé. Ao contrário, os requisitos mandatórios para o usuário se resumem a indicar o diretório dos arquivos COMTRADE e selecionar quais sinais, presentes nos arquivos indicados, devem ser enviados ao relé.

As seções subsequentes tem como objetivo ilustrar as soluções e metodologias empregadas para superar os desafios da implementação a fim de maximizar esse recurso de teste do relé. Assim como o procedimento padrão, a versão proposta segue os mesmos princípios básicos, porém, adicionando suporte para interação simultânea com múltiplos relés, geração de arquivos de teste em tempo real, testes agendados auto-sincronizados e aquisição automática de oscilografias. O conceito de teste proposto é ilustrado na Figura 4.1.

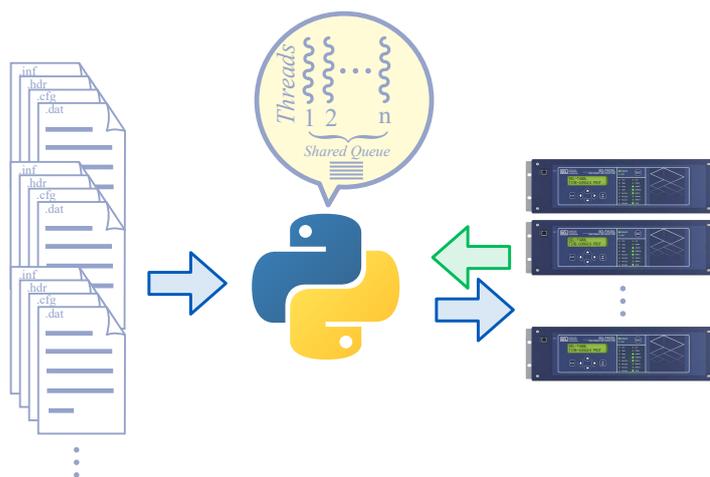


Figura 4.1. Versão proposta para utilizar o recurso de teste do SEL-T400L.

4.2 ORIENTAÇÃO AO OBJETO E CONCORRÊNCIA

Orientação ao objeto é um paradigma de programação usado para modelar uma aplicação como sendo formada pela interação de objetos. Cada objeto é constituído por uma coleção de dados e procedimentos a fim de executar alguma tarefa específica. A associação desses objetos compõe a interface entre o usuário e a aplicação, de modo que conhecimento sobre como os objetos são conectados não é demandada e é, inclusive, intencionalmente ocultada. Além disso, como objetos são independentes entre si, o mesmo objeto pode ser empregado em diversas partes da aplicação ou até mesmo em outras, facilitando, assim, manutenibilidade e reusabilidade (PHILLIPS, 2015).

A ideia por trás de empregar orientação ao objeto na proposta de explorar eficientemente o recurso de teste disponibilizado pelo SEL-T400L é que, dessa maneira, seria possível que interações com vários relés fossem tratadas como diferentes instâncias do mesmo objeto, utilizando o mesmo código, porém cada instância encapsulando dados do respectivo relé. Assim, instâncias do mesmo objeto, também chamado de classes em *Python*, embora compartilhando as mesmas instruções não tem conhecimento de detalhes fora do seu escopo. Mais importante ainda, essa implementação promove abstração da lógica interna de teste no relé. De fato, o único requisito é conhecimento dos métodos (procedimentos) disponíveis e quais parâmetros de entrada são necessários. Portanto, o usuário não precisa ter conhecimento de como conectar, enviar comandos ou transferir arquivos para o relé e nem gerar arquivos especiais para utilizar a funcionalidade de teste.

Nesse contexto, aplicando o conceito orientação ao objeto na implementação da solução de teste proposta, os relés SEL-T400L em um esquema de teste seriam tratados como objetos instanciados de uma classe genérica com a qual o usuário interage diretamente. A funcionalidade de teste via *digital playback* estaria encapsulada em um método dessa classe em conjunto com os dados específicos de cada dispositivo, usados ao instanciá-lo, como endereço IP (*Internet Protocol*), usuário e senha de acesso para comunicação com o relé.

Por outro lado, embora com essa filosofia de implementação, de fato, qualquer número de objetos, e, conseqüentemente, de relés, seja suportado, a operação é originalmente síncrona. Portanto, é necessário que uma tarefa termine antes de começar a próxima. Esse modelo síncrono não é uma implementação eficiente, pois inviabilizaria testes agendados para esquemas de múltiplos relés, uma vez que primeiro seria executado o teste em um relé, para somente então prosseguir para o próximo relé.

Outra limitação desse tipo de modelo de execução sequencial é a ineficiência em tarefas dominadas, predominantemente, por processos de entradas/saídas (I/O). Esses processos se referem não excursivamente ao envio de pacotes via rede, mas também à interação dentro do mesmo sistema, como acesso a arquivos (leitura e escrita). De fato, após ser emitida uma solicitação, por causa da natureza dessas tarefas, o processador fica basicamente esperando resposta. Como resultado, ciclos de processamento são desperdiçados ao invés de processar uma outra tarefa. A Figura 4.2 ilustra alternativas para processamento de tarefas dependentes de I/O.

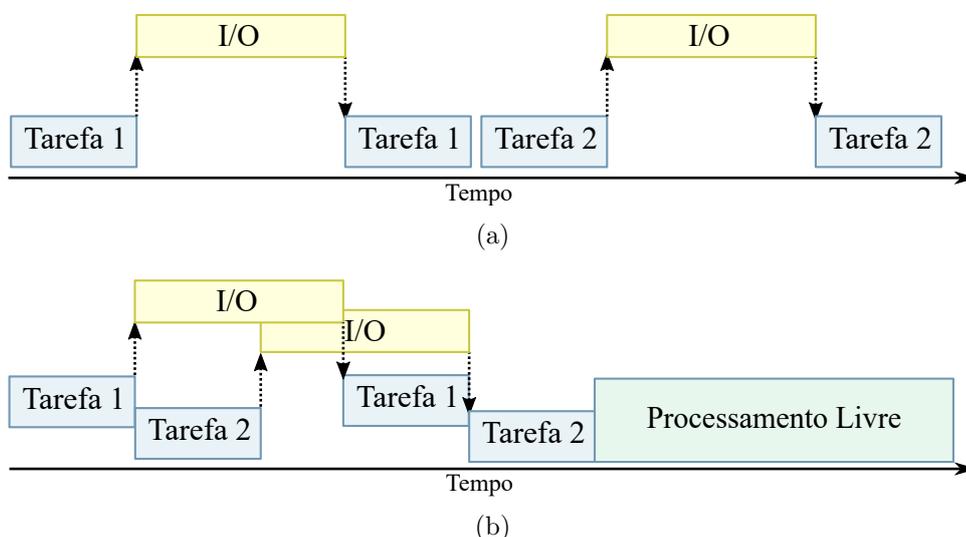


Figura 4.2. Diferenças entre processamento de tarefas (a) sequenciais e (b) concorrentes

Em termos de eficiência e alocação ótima de recurso para tarefas predominante concentradas em I/O, o ideal seria executar as tarefas concomitantemente assim como na Figura 4.2(b). Dessa forma, enquanto uma tarefa está inativa, apenas aguardando resposta, outra é executada. Essa operação assíncrona pode ser implementada, em *Python*, por meio de um módulo padrão da linguagem chamado *Threading*. *Threads* podem ser interpretadas como subprocessos gerados pelo processo principal para executar alguma tarefa.

No contexto da implementação desenvolvida para testes no SEL-T400L, a cada objeto que é instanciado representando um novo relé, o processo principal gera uma nova *thread* como mostrado na Figura 4.1. Além dessa implementação facilitar a execução de testes agendados (os testes são executados em conjunto em todos os relés com objetos instanciados), é extremamente benéfico em termo de melhor uso do recurso computacional em esquemas com mais de um relé sob teste. Todos os subprocessos necessários (leitura de COMTRADE, escrita de arquivo *playback*, transferências de arquivos para/dos relés e envio de comandos para controle do teste) são largamente baseados em I/O.

Ao comparar a duração da transferência entre implementações síncronas e assíncronas, a partir de dois códigos escritos com e sem o uso do módulo *threading* em conjunto com *ftplib* enviando arquivos para dois SEL-T400L, é evidente a redução de tempo provocada ao dividir o processo principal em duas *threads*, uma para cada relé, assim como ilustrado na Figura 4.3. A implementação assíncrona reduz o tempo necessário para completar a transferência praticamente na metade. Assim, essa implementação é benéfica para testes que envolvem esquemas com múltiplos relés, sem nenhuma desvantagem em teste com apenas um relé. Esse mecanismo, contudo, não deve ser confundido com paralelismo. Em *Python*, devido ao *Global Interpreter Lock* (GIL), apenas uma única *thread* tem o controle sobre o interpretador. O que

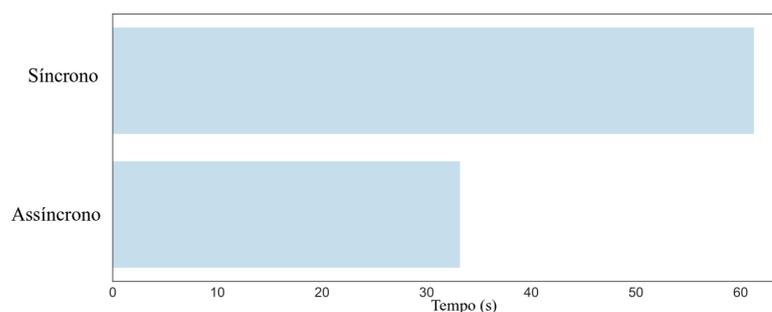


Figura 4.3. Comparação de duração de transferência de arquivo para dois relés na presença e ausência de *multithreading*.

de fato acontece ao utilizar mais de uma *thread* é chamado *Context Switching*, em que os ciclos do processador são alternados entre *threads*, dando a impressão de paralelismo.

4.3 GERAÇÃO DO ARQUIVO DE TESTE

Ao analisar o arquivo de teste gerado a partir do programa fornecido pelo fabricante, nota-se que a estrutura do mesmo é similar a um formato proposto na norma do COMTRADE de 2013, como revisão da anterior de 1999 . Esse novo formato, basicamente, consolida todos os arquivos que formam o padrão COMTRADE (*.dat*, *.cfg*, *.hdr*, *.inf*) em um único arquivo (*.cff*) com as amostras do *.dat* em binário com 32 bits, assim como apresentado na Figura 4.4 (IEEE, 2013). Contudo, embora o arquivo de teste tenha essa mesma estrutura, instruções para o relé são introduzidas na seção do HDR. Portanto, o relé não suporta diretamente arquivos *.cff*. Vale ressaltar que o relé rejeita transferência de arquivos que não estão de acordo com o padrão esperado.

Como supracitado, o que diferencia o arquivo *playback* do arquivo introduzido na norma do COMTRADE de 2013 é o conteúdo do HDR, uma vez que a norma não especifica exigência

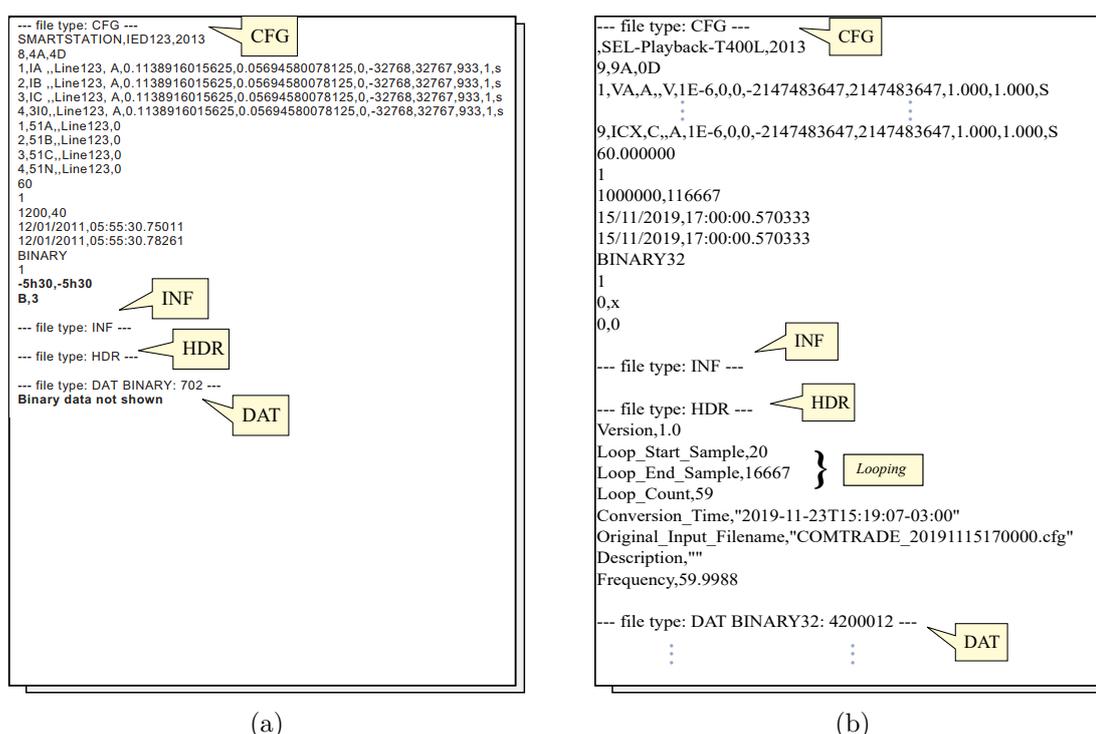


Figura 4.4. Estrutura de arquivos: (a) *.cff* (b) *.ply*

alguma para esse arquivo, sendo inclusive tratado como opcional (*.dat* e *.cfg* são obrigatórios) (IEEE, 2013). Por outro lado, devido aos fundamentos de elementos baseados em grandezas incrementais e ondas viajantes, é crucial que, por questões de segurança, os sinais de entrada de tensão e corrente sejam detectados como uma referência suficientemente estável para que os elementos sejam ativados (SEL, 2020),(SCHWEITZER *et al.*, 2016). Dessa maneira, o relé precisa ser suprido com uma duração adequada de pré-falta para que fique inteiramente operacional.

Assim, ao invés de demandar uma quantidade mínima de pré-falta para geração do arquivo de teste, com a finalidade de ativar as funções de proteção, a lógica de controle de teste do relé possui um recurso chamado *looping* a fim de promover mais flexibilidade. Resumidamente, com as instruções adequadas no formato esperado pela lógica de controle teste do relé, antes de executar propriamente o evento, o primeiro ciclo dos sinais presentes no arquivo de teste serão executados repetidamente por um segundo, armando o dispositivo tal como ocorreria em campo. A Figura 4.4(b) ilustra também as informações do *looping* presente na seção HDR de um arquivo *playback*.

Nesse sentido, a proposta implementada usando *Python* não apenas precisa gerar um arquivo no formato único (*.cff*) a partir de um outro arquivo no padrão COMTRADE, mas também fornecer as instruções adequadas para a lógica de controle de teste contidas da seção do HDR. Além disso, também é do interesse que seja possível adequar o nível dos sinais, visto que as relações de transformação podem não estar de acordo com o parametrizado no relé ou até mesmo no COMTRADE com sinais primários provenientes diretamente de *software* do tipo EMTP.

Com relação à lógica de geração de arquivos de teste, assim como explicado no capítulo anterior, o procedimento de teste original do SEL-T400L, em sua concepção, não foi planejado para suportar testes extensivos. Dessa maneira, para cada teste e relé, os arquivos de teste devem ser gerados e transferidos manualmente para o respectivo relé. Portanto, não há oportunidade de melhoria apenas na geração e transferência implementadas separadamente, mas também ao integrar esses dois procedimentos.

Como alternativa, no caso da implementação proposta, a partir dos sinais que o usuário tem interesse em enviar para o relé, ao invés de gerar, primeiramente, todos os arquivos de teste

desejados para em seguida iniciar o procedimento de teste no relé, os arquivos são gerados em tempo real. Isso permite um ganho pelo fato de que os arquivos não precisariam ser escritos em disco (e depois lido novamente para transferí-lo para o relé). Com o arquivo de teste construído diretamente na RAM já estaria pronto para ser transferido para o relé. Isso adiciona uma camada de abstração importante na interação com o usuário, uma vez que a existência do arquivo de teste intermediário passa a ser desconhecida e, do ponto de vista do usuário, a metodologia se apresenta como diretamente compatível com arquivos COMTRADE.

4.4 INTERAÇÃO COM O RELÉ

Seguindo o procedimento, com o arquivo de teste gerado, o próximo passo seria a transferência desse arquivo para o relé via FTP. O relé SEL-T400L opera também como um servidor FTP expondo arquivos armazenados no relé para um cliente ao conectar-se. Portanto, para iniciar a conexão, é necessário um cliente FTP, endereço IP do relé e credenciais de acesso (SEL, 2020). Como IP e dados de acesso (usuário e senha) do relé são conhecidos e são parâmetros de entrada para instanciar o objeto na implementação, a única preocupação é com a implantação do cliente FTP. Felizmente, existe um pacote padrão em *Python*, chamado *ftplib*, que define uma classe "FTP" que implementa um cliente FTP (ROSSUM, 1995).

A transferência de arquivos a partir da classe FTP da *ftplib* é feita pelo método *storbinary*. Para tanto, esse método requisita, como entrada, um objeto proveniente da leitura de um arquivo. Contudo, no caso da concepção desejada para testes no SEL-T400L, arquivos de teste não existirão escritos no sistema de arquivos. Por outro lado, a partir do pacote *io* (também padrão em *Python*) é possível gerar um objeto similar ao proveniente da leitura de um arquivo (*file-like object*) a partir de dados na memória. Como *storbinary* exige dados binários para a transferência, é criado um objeto contendo estrutura e dados do arquivo *playback* usando a classe *BytesIO* do pacote *io*.

Com a transferência realizada, a etapa seguinte é emitir os comandos adequados para inicialização do teste. Nesse caso, o relé suporta comandos padronizados pelo fabricante via protocolo Telnet (SEL, 2020). Similarmente à conexão FTP, é preciso ter as credenciais e um cliente Telnet, também suportado nativamente em *Python* por meio do pacote *telnetlib*. A implementação

também é semelhante à *ftplib*, possuindo uma classe que implementa o cliente para conexão com um servidor. Nesse caso, o método de principal interesse é o *write*, responsável por formatar e enviar um comando para o servidor Telnet.

O procedimento de envio dos comandos, contudo, possuem variações dependendo do tipo de teste desejado pelo usuário. No caso de testes com inicialização manual, assim que a transferência do arquivo for terminada, o comando de inicialização de teste pode ser enviado sem necessidade de nenhum pré-procedimento. Além disso, como cada relé possui a sua *thread*, é possível utilizar esse esquema de teste também em múltiplos relés em situações que não é do interesse avaliar o relé em sua totalidade ou até mesmo entender como os relés funcionariam se ocorresse uma perda de comunicação no esquema.

Por necessitar da informação de quando o evento deve ser executado, testes com inicialização agendada necessitam especificar, ao comandar o teste, o horário que estes devem ser iniciados. Para tanto, é essencial adquirir a hora atual que consta no relé, uma vez que é necessário entrar com o formato de hora futura em conformidade com o relé (hh:mm:ss). Isso é crucial para esquemas com múltiplos SEL-T400L com comunicação ativa, já que com cada relé executando teste em tempos diferentes não é representativo do que aconteceria em evento na realidade. Ademais, por compartilharem informações (TW87, teleproteção e localização de faltas), os relés do esquema receberiam dados atrasados ou adiantados com cada relé em um instante diferente do evento no tempo.

Por outro lado, como cada relé possui sua *thread* associada, sendo independente e desconhecendo a existência de outras *threads*, implementando uma simples aquisição de hora do relé antes de enviar o comando de agendamento do teste, não é suficiente para garantir que o horário de agendamento seria o mesmo em todos os relés. De fato, cada *thread*, justamente por ser independente, pode estar em partes diferentes do código no mesmo instante de tempo. Portanto, atingiriam o instante de adquirir o horário do relé em momentos diferentes. Consequentemente, cada relé teria um horário diferente agendado, mesmo todos SEL-T400L com relógios sincronizados entre si. Vale ressaltar que esse processo é necessário, pois não há garantia de que o horário do computador por onde o teste é feito está em sincronismo com o horário dos relés. Portanto é crucial capturar, de fato, o horário do relé.

Uma solução parcial para o problema seria implementar uma fila para compartilhamento

do horário de agendamento do teste. Caso a fila seja vista como vazia por uma *thread*, significaria que nenhuma outra *thread* atingiu esse segmento do código para adquirir horário do relé. Portanto, essa *thread* seria a responsável por definir o horário de agendamento e introduzi-lo na fila. Contudo, isso introduz um conflito de sobreposição de *threads* no acesso do mesmo recurso. Tal problema é relevante na medida em que, enquanto a primeira *thread* ainda não preencheu a fila, uma segunda *thread* ao observar a fila ainda vazia, também ganharia acesso para adquirir e preencher a fila e, conseqüentemente, com um horário diferente. Como resultado, o problema de horários de agendamentos diferentes entre os relés do esquema permanece.

Filas são, de fato, um recurso útil quando é do interesse compartilhar informações entre *threads*, porém assim como qualquer recurso compartilhado, é crucial tomar precauções para evitar situações de sobreposição de acesso como supracitado. Na realidade, esse tipo de problema é comum ao empregar *multithreading* e são implementados mecanismos de sincronismo de *threads* para contornar o problema. Basicamente, a ideia desses mecanismos de sincronismo é travar a execução de outras *threads* se alguma outra está com o controle da operação.

Particularmente, no caso da implementação de compartilhamento em questão, o tipo mais simples de sincronização de *threads*, chamado *lock*, é suficiente, uma vez que não importa qual *thread* será a responsável por compartilhar o tempo, já que a hora de todos os relés é a mesma, sendo necessário estarem sincronizados para o teste agendado. No *lock*, quando uma *thread* adquirir o controle, nenhuma outra *thread* terá direito de prosseguir até que o *lock* seja liberado pela respectiva *thread*. Felizmente, o próprio módulo de *multithreading* em *Python* possui suporte para sincronização por *lock*.

Vale ressaltar que, o emprego de *multithreading* e fila em conjunto com a sincronização das

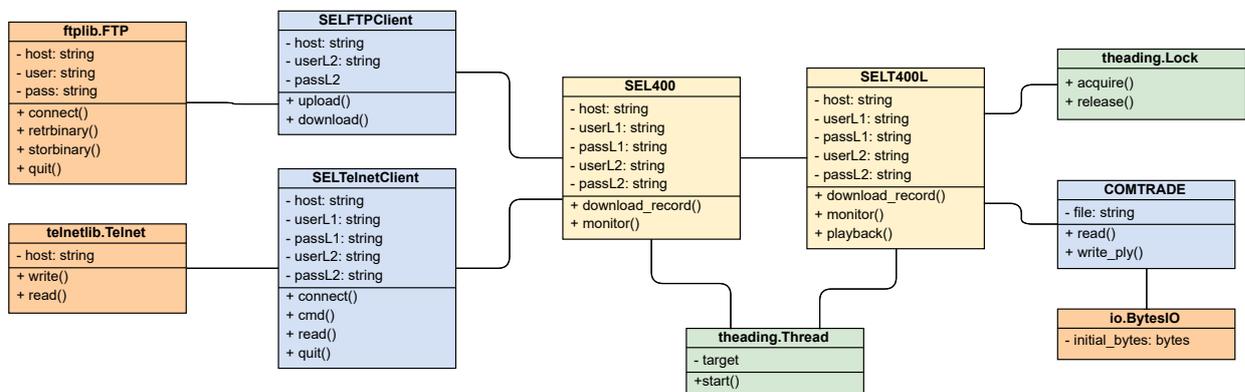


Figura 4.5. Versão proposta para utilizar o recurso de teste do SEL-T400L.

threads permite que o teste seja agendado praticamente com o tempo mínimo necessário (2 minutos). Tal fato seria impraticável se o procedimento fosse sequencial e muito menos na forma manual, visto que é preciso agendar o teste com sobra para conseguir acessar outros relé e ajustar o instante de início do teste com pelo menos ainda 2 minutos para o horário desejado inicialmente. A Figura 4.5 apresenta a arquitetura simplificada da implementação.

Os objetos expostos para interação do usuário são *SEL400* e *SELT400L*. Por compartilhar boa parte das funcionalidades com outros relés da série 400 da SEL, a classe *SELT400L* é composta por uma instância da classe *SEL400* que fornece as funcionalidades básicas mais comuns, enquanto as implementações únicas ao SEL-T400L, como o *playback*, são implementadas apenas na respectiva classe. Portanto, o relé SEL-T400L pode ser visto como a composição de um relé da série 400 com funcionalidades adicionais.

O processo final de aquisição de oscilografias resultantes, embora não faça parte formalmente da metodologia de teste, é relevante para qualquer análise de desempenho de proteção. Dessa maneira, após comandar a execução do teste cada *thread* monitora o seu respectivo relé por novo evento sendo escrito na memória. Assim que um novo evento aparece no histórico, novamente é usado *ftplib*, porém para adquirir a oscilografia dos relés por meio do método *retrbinary*. A fim de evitar confusão na análise dos eventos o nome do arquivo de teste executado é concatenado ao nome padrão da oscilografia proveniente do relé.

O procedimento é então repetido até que todos os arquivos COMTRADE dentro do diretório indicado tenham sido executados e todas as oscilografias resultantes capturadas. Caso a execução do código seja interrompida e todos os casos ainda não tenham sido testados, o processo continuará de acordo com o último evento adquirido do relé. Vale ressaltar que a explicação fornecida sobre todos os processos assim como a arquitetura foi simplificada a fim de facilitar o entendimento geral.

Como resultado da abstração empregada, não é demandado qualquer conhecimento sobre a lógica interna para realizar testes no relé. Portanto, a fim de demonstrar a simplicidade do resultado final, a Figura 4.6 apresenta um exemplo de como instanciar um objeto e inicializar o teste em um relé. Primeiramente é criada uma instância da classe *SELT400L* de acordo com os parâmetros apropriados. Em seguida, o método *playback* é executado para iniciar o teste, precisando apenas de informações sobre quais sinais presentes no COMTRADE serão enviados

para o relé (V, IW e IX), se o teste será sincronizado com outros relés (*time_sync*) e se os sinais são primários ou secundários (PS). Com a execução do código ajustado pelo usuário, para cada chamada no método *playback*, será aberta uma janela para o usuário especificar o diretório dos arquivos COMTRADE para teste. Dessa maneira, será inicializado o processo de teste automático, sendo todos os arquivos COMTRADE presentes no diretório testados em sequência

No caso de testes envolvendo mais de um relé, basta repetir o mesmo código para cada dispositivo, alterando os parâmetros de entrada em conformidade com cada dispositivo, e marcar o parâmetro de sincronização caso seja desejado proceder com testes agendados. Desse modo, o próprio código cuidará do agendamento de cada teste, sempre com o tempo mínimo possível. Em caso de sinais primários, antes de gerar os dados para o arquivo de teste, será adquirido do relé as relações de transformação para adequar os sinais automaticamente. Porém, caso necessário, é possível entrar com as relações de transformações, que nesse caso não serão adquiridas do relé.

Além das vantagens qualitativas resultantes dos recursos implementados, também é possível verificar, quantitativamente, os benefícios da ferramenta desenvolvida, assim como ilustrado na Figura 4.7. As medições foram feitas a partir da média de três repetições do teste do mesmo arquivo COMTRADE envolvendo esquemas com um e dois relés, mas repetindo o procedimento sempre do início. Ressalta-se ainda que não foi levado em consideração o tempo necessário para inicialização dos programas do fabricante (considerando já abertos), apenas o tempo gasto pelo usuário para realizar atividades diretamente relacionadas aos testes, troca de relés quando necessário, tempo para o programa responder ou liberar o controle para o usuário.

```
from SEL400Series import SELT400L

RELAY1=SELT400L(host='192.168.1.4',
userL1='ACC',passwordL1='OTTER',
userL2='2AC',passwordL2='TAIL')

SELT400L.playback(PS='S',time_sync='n',V=[1,2,3]
IW=[None,None,None],IX=[4,5,6])
```

Figura 4.6. Exemplo de instanciação do objeto da classe *SELT400L* e execução da funcionalidade *playback*.

A partir da Figura 4.7, é evidente a maior eficiência que o desenvolvimento promove com relação ao uso do recurso disponível. A maior vantagem está na transferência de arquivos de teste para o relé, principalmente quando mais de um relé é empregado. Isso ocorre devido à necessidade de trocar de relé no programa original de envio e espera da resposta do programa de controle do teste. Portanto, quanto maior o número de relés testados, maior tende a ser o ganho. Embora não apresentado na Figura 4.7 por não fazer parte formalmente da lógica de testes, o mesmo benefício do envio do arquivo de teste é visto na aquisição de oscilografias do relé. Mesmo com a oscilografia ajustada na duração mínima, a transferência dos registros (1 MHz e 10 kHz) leva cerca de 80 segundos por relé (SEL, 2020). Além disso, assim como no envio do arquivo de teste para mais de um relé, leva tempo para trocar a conexão entre relés e esperar o programa carregar todos os dados. Logo, no caso de dois relés, por exemplo, levaria mais de 160 segundos para concluir a transferência, enquanto a proposta levaria por volta de 80 segundos.

Por fim, vale enfatizar que pelo processo de teste ser largamente limitado por I/O (*I/O-bound*) e não por tarefas intensivas computacionalmente (*CPU-bound*), o ganho com capacidade computacional é marginal uma vez que o tempo de espera por I/O continua o mesmo. Portanto, os resultados obtidos pela ferramenta escrita em *Python* são reproduzíveis independente do computador usado, desde que uma banda de comunicação ao redor de 3 Mbps esteja disponível para cada relé testado. A única parte do processo que possui *CPU-bound* é a geração do arquivo de teste, mais especificamente nos cálculos para obter os dados binários escritos no arquivo

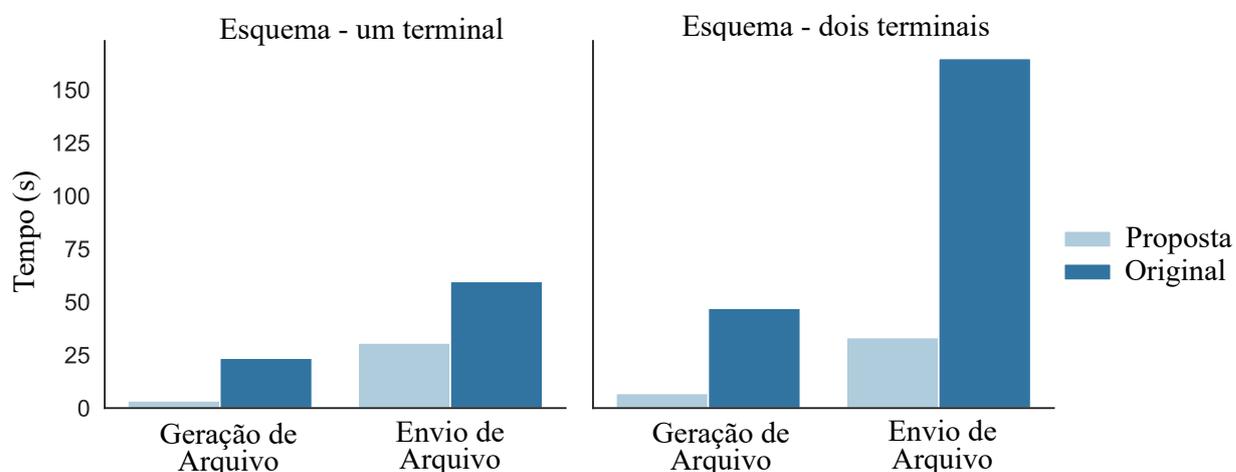


Figura 4.7. Comparação de tempo para geração de arquivos e transferência para o relé.

playback. Porém, é evidente que a contribuição desse processo no tempo final é reduzida. Inclusive, é possível verificar que o emprego de *threads* não resultou em ganhos de eficiência com relação a geração de arquivos. O tempo para geração de um arquivo (testando apenas um terminal) foi praticamente dobrado quando o teste envolveu a geração de dois arquivos, comportamento típico para tarefas que são *CPU-bound*. Por outro lado, a transferência de arquivo se mostrou como *I/O-bound*, mantendo praticamente o mesmo tempo para transferência envolvendo dois relés comparado com apenas um relé.

EXEMPLO DE POSSÍVEIS ANÁLISES

Este capítulo apresenta um demonstrativo de exemplos de análises que tornaram-se possíveis com o desenvolvimento apresentado no capítulo anterior. Tem-se o foco em teste de aplicação, assim como classificado no escopo da norma IEEE C37.233-2009, incluindo avaliações genéricas do relé como um todo e também mais específicas voltadas para elementos individuais.

5.1 APLICAÇÃO 1: AVALIAÇÃO SISTÊMICA

Esta análise apresenta uma avaliação inicial de aplicabilidade do relé SEL-T400L na linha de transmissão real do SIN. Para tanto, são gerados cenários a partir de uma modelagem em programa do tipo EMTP. Embora existam avaliações anteriores sobre o desempenho do SEL-T400L para eventos reais (SCHWEITZER *et al.*, 2016), (LOPES *et al.*, 2019), verificações de aplicabilidade são relevantes, devido às particularidades de cada sistema e interesse em entender os limites de sensibilidade do esquema de proteção para dada aplicação (IEEE, 2009).

5.1.1 Linha de Transmissão Tucuruí-Xingu

A linha de transmissão Tucuruí-Xingu fez parte do Lote A do Leilão 04/2008 com a finalidade de interligar regiões isoladas do SIN na região norte do Brasil, constituindo a denominada interligação Tucuruí-Macapá-Manaus. A implantação do trecho Tucuruí-Xingu, localizada no estado do Pará, foi feita em circuito duplo com extensão de 264 km e tensão nominal em 500 kV/60 Hz (ANEEL, 2008). A Figura 5.1 apresenta, em resumo, o posicionamento da linha de transmissão Tucuruí-Xingu no SIN.

A implantação do sistema Tucuruí-Macapá-Manaus desencadeou uma reavaliação da integração do complexo hidrelétrico de Belo Monte devido à proximidade da subestação Xingu,

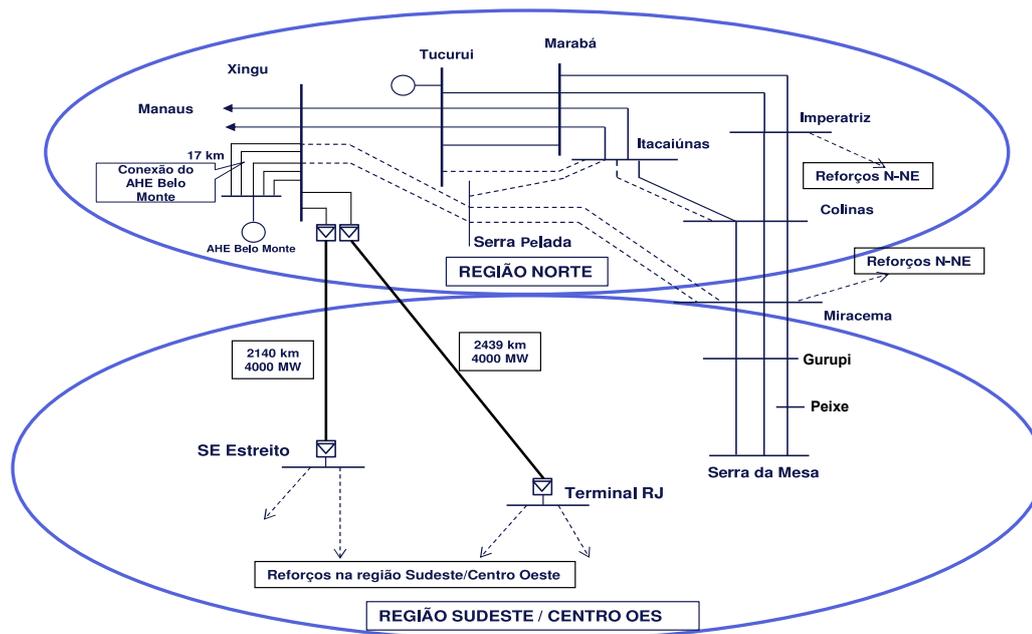


Figura 5.1. Sistema Interligado Nacional, conexão do complexo hidrelétrico de Belo Monte (EPE, 2017).

estando a 17 km da usina. Inicialmente era previsto que a conexão do complexo de Belo Monte, com capacidade instalada de 11.233 MW, seria dado por dois circuitos de 751 km em 750 kV para a subestação Colinas (EPE, 2009). Como resultado, a fim de possibilitar o escoamento pleno da potência de Belo Monte com essa nova integração com a rede de 500 kV em circuito duplo, foi recomendada a implantação de dois bipolos em corrente contínua em ± 800 kV, partindo da subestação Xingu com chegada na região sudeste por meio das subestações Estreito e Terminal RJ com extensão de 2140 km e 2439 km, respectivamente (EPE, 2017).

Como resultado, a linha de transmissão Tucuruí-Xingu encontra-se em uma posição estratégica para a operação do SIN, especialmente ao considerar que o reforço por meio da subestação Serra Pelada está previsto para entrar em operação somente em 2023 (EPE, 2019). De fato, Tucuruí-Xingu é monitorada pelo Sistema Especial de Proteção (SEP) implantado na região para coordenar mudanças de geração e fluxo na ocorrência de alguma contingência (ONS, 2020).

5.1.2 Procedimento de Teste

A fim de avaliar o desempenho do relé SEL-T400L na linha de transmissão Tucuruí-Xingu, a região apresentada na Figura 5.2 foi simulada no *Alternative Transient Program* (ATP). Além da linha de transmissão de interesse, as conexões em 500 kV com as subestação Marabá, Vila do

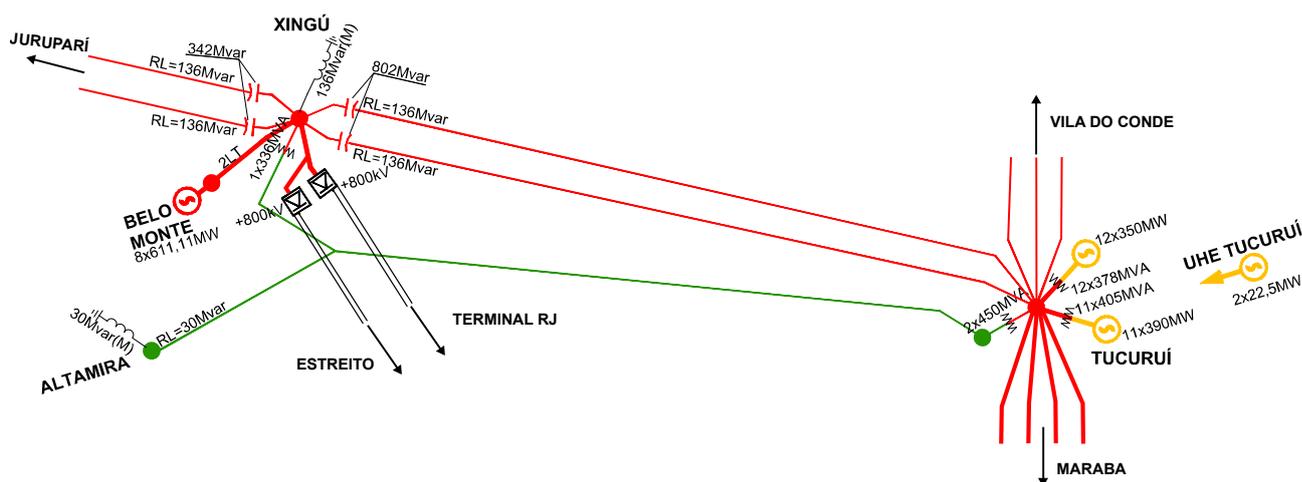


Figura 5.2. Sistema simulado para geração de eventos.

Conde e Jurupari e 230 kV com equivalente em Altamira também estão presentes na simulação junto com respectivas gerações e seus devidos componentes como bancos de capacitores série e reatores *shunt* e também os filtros CA dos bipolos. Dessa maneira, além de ser importante para a operação da região, Xingu-Tucuruí também apresenta características desafiadoras para sistemas de proteção.

A avaliação foi conduzida a partir da simulação de eventos internos e externos ao circuito 2 de Xingu-Tucuruí, assumido como o circuito protegido pelo SEL-T400L. Todos os eventos foram gerados a partir de simulações com passo de $1 \mu s$ devido aos requisitos do SEL-T400L. Assim, foi avaliado um total de 396 eventos (256 internos e 140 externos) variando local da falta em 4 localizações por trecho de transposição, tipo de falta (monofásico, bifásico, bifásico-terra e trifásico), ângulo de incidência da falta (0° e 90°), resistência de falta para curtos-circuitos sem terra (0Ω e 20Ω) e com terra (0Ω e 50Ω). Os eventos externos foram gerados com faltas no circuito 1 de Xingu-Tucuruí e também em Xingu-Jurupari, sendo todos francos com ângulo de incidência em 90° .

Os testes no SEL-T400L foram realizados exclusivamente por meio da implementação do *digital playback* apresentada neste trabalho. Como o objetivo desta avaliação é verificar o desempenho completo do relé, um esquema de dois relés sincronizados foi empregado assumindo cada relé em um terminal do circuito protegido (Xingu e Tucuruí). Dessa maneira, os testes foram conduzidos de forma agendada, visto que é a única forma de testar os elementos de proteção que dependem de comunicação com o terminal remoto.

5.1.3 Resultados

De posse das oscilografias do relé, os resultados são consolidados em gráficos de densidade de probabilidade em função do local da falta e tempo de atuação do elemento de proteção, além de percentuais de atuação por elemento. A comunicação entre os relés é feita a partir de uma fibra óptica curta e, portanto, os tempos de atuação não consideram a latência do canal de comunicação. Com relação aos casos externos, embora apenas elementos direcionais (TD32 e TW32) tenham sido sensibilizados (como esperado para faltas externas diretas ao relé), em nenhum caso houve confirmação de curto-circuito direto pelos dois terminais. Portanto, os elementos do relé em conjunto com a parametrização mostraram-se seguros contra operações indevidas.

A análise dos eventos internos é iniciada a partir da verificação do percentual de operação por elemento de proteção em relação aos casos testados para os relés em Xingu e Tucuruí, Figuras 5.3(b) e 5.3(a), respectivamente. Além dos elementos de proteção dos relés (TD21, TD32, TW32 e TW87) foram incluídas também variáveis que indicam permissão por *trip* por comunicação (COMPRM) e permissão de *trip* do relé (TRPRM). A TD21 é dividida em elementos de terra (TD21G) e fase (TD21P), enquanto TD32 e TW32 são representas pelos indicadores de falta direta (TD32F e TW32F).

A partir da Figura 5.3, iniciando com os elementos de distância (TD21G e TD21P), observa-se uma quantidade inferior para o elemento de terra do que o de fase. Isso é devido, em parte,

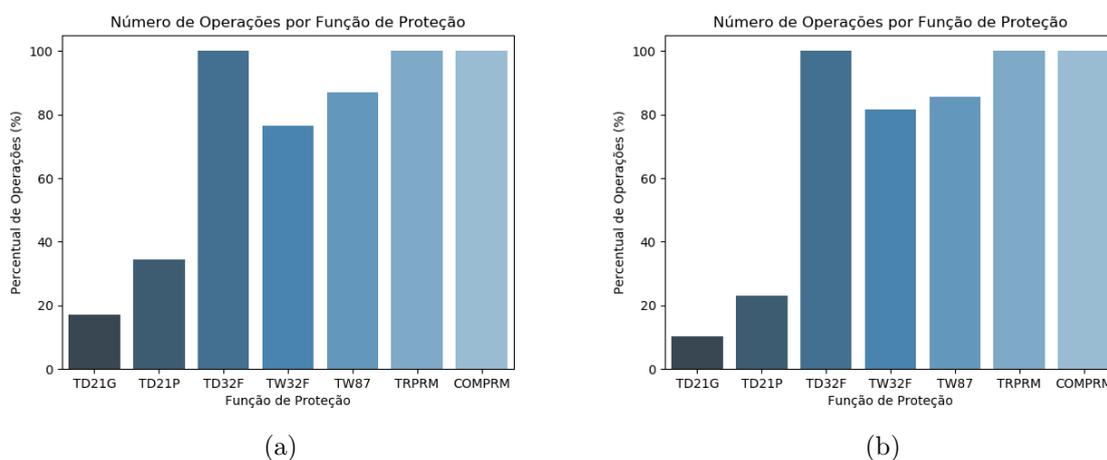


Figura 5.3. Percentual de atuação: (a) Xingu e (b) Tucuruí

aos tipos de falta testados. Enquanto a TD21P é sensibilizada por faltas bifásicas, bifásicas-terra e trifásica, a TD21G não é sensibilizada por faltas bifásicas nem trifásicas, mas por monofásicas e bifásicas-terra. Além disso, ressalta-se que curtos-circuitos que envolvem a terra foram avaliados com resistências máximas (50Ω) maiores do que curtos-circuitos entre fases (20Ω). Ainda assim, a TD21 demonstrou dificuldade em cobrir um número significativo de cenários nesse sistema.

Por outro lado, a TD32 mostrou-se como o elemento de proteção mais confiável do esquema. Atuando em todos os casos testados. Vale reforçar que a permissão para *trip* via TD32 é efetuada apenas pela lógica de teleproteção via POTT. Assim sendo, por segurança, depende que todos relés do esquema sejam sensibilizados. A lógica de permissão de *trip* por comunicação, variável COMPRM, inclui a operação do esquema via POTT e também o DTT.

Os elementos de proteção por ondas viajantes, TW32 e TW87, também apresentaram bom desempenho, com detecções próximas a 80% dos cenários testados. Como esperado, devido à inexistência de ondas viajantes lançadas, praticamente todos os casos sem atuações da TW32 e TW87 foram curtos-circuitos com ângulo de incidência em 0° , com exceção de eventos pontuais de faltas entre fases com resistência de 20Ω . No entanto, considera-se que, como curtos-circuitos com ângulo de incidência próximo de 90° são mais comuns (SOUSA *et al.*, 2017), os elementos TW32 e TW87 se mostraram confiáveis.

Prosseguindo para as visualizações de tempo de atuação e alcance, os resultados para a TD21 são apresentados na Figura 5.4. Tanto TD21G quanto TD21P tem sua região de atuação concentrada dentro de 4 milissegundos e para faltas mais próximas. Tal fato é justificado pela tendência da TD21 em reduzir a sensibilidade a medida que o curto-circuito aproxima-se do alcance, resultando em um menor número de atuações (SCHWEITZER *et al.*, 2016).

Ressalta-se ainda a diferença entre cobertura da TD21, tanto fase quanto terra, entre os dois terminais, embora ambos estejam parametrizados com o mesmo alcance (70% para TD21G e 75% para TD21P). A cobertura da TD21 em Tucuruí foi de, aproximadamente, 70% para TD21G e 63% para TD21P, enquanto, em Xingu 56% e 53% para TD21G e TD21P, respectivamente. Essas diferenças decorrem do acoplamento mútuo entre os circuitos da linha de transmissão de circuito duplo e da contribuição de curto-circuito dos equivalentes (APOSTOLOV *et al.*, 2007),(SCHWEITZER *et al.*, 2016).

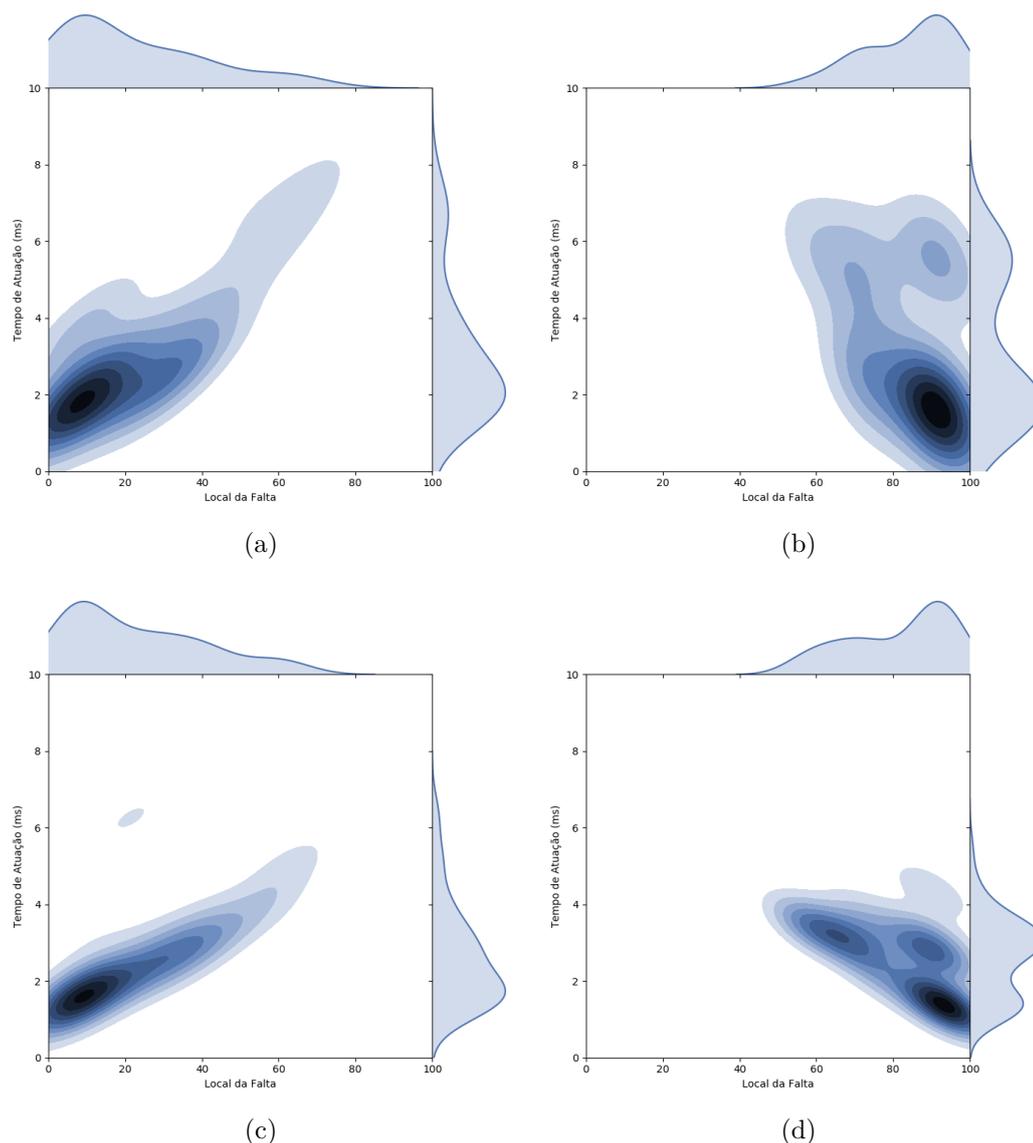


Figura 5.4. Densidade de probabilidade para TD21: (a) TD21G em Tucuruí, (b) TD21G em Xingu, (c) TD21P em Tucuruí e (d) TD21P em Xingu.

Com relação aos elementos direcionais, tal como apresentado na Figura 5.5, em conformidade com o resultado da Figura 5.3, eventos em qualquer posição da linha de transmissão sensibilizam a TD32 com tempo máximo de atuação na ordem de 3 milissegundos. Além disso, notam-se duas regiões de concentrações de atuação, um estando mais próxima do terminal (mais rápida) e outra mais distante (mais lenta). Contudo, a detecção da falta direta pelo elemento TD32F não indica permissão para *trip*, assim como mencionado anteriormente, sendo necessária a confirmação pelo outro terminal por meio do esquema POTT. Assim como a TD21, existem diferenças de atuação entre os terminais, porém, no caso da TD32, se resume em espalhamento no tempo de atuação. Desse modo, a TD32 em conjunto com o esquema POTT se mostrou

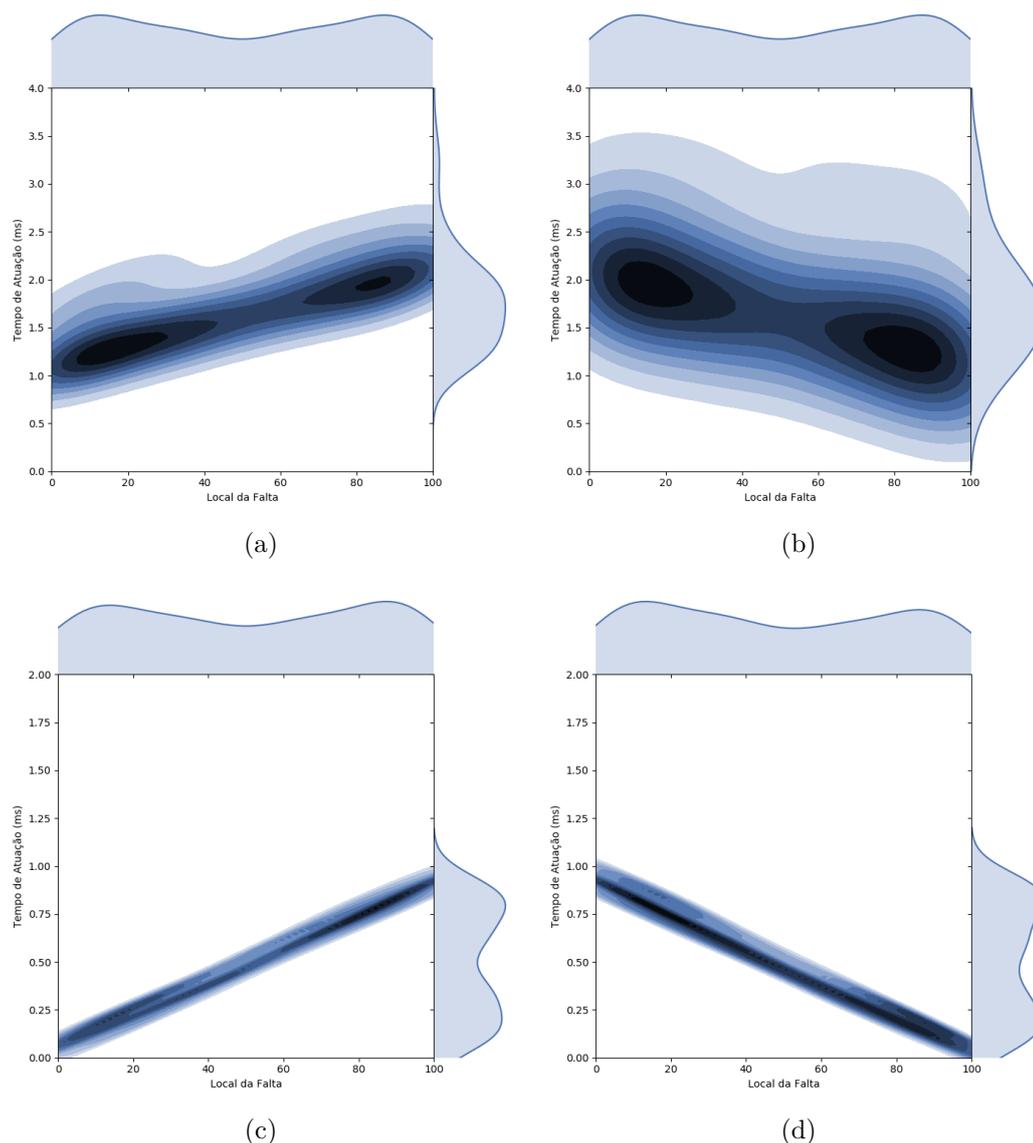


Figura 5.5. Densidade de probabilidade para os elementos direcionais: (a) TD32 em Tucuruí, (b) TD32 em Xingu, (c) TW32 em Tucuruí e (d) TW32 em Xingu.

eficaz em detectar faltas em toda a linha de transmissão, mesmo em situações mais adversas como nos curtos-circuitos não francos testados.

No caso da TW32, embora exista a ocorrência de faltas com ângulo de incidência próximo de zero, os resultados de tempo de atuação e cobertura presentes na Figura 5.5 correspondem à maioria dos eventos. De maneira similar a TD32, a TW32 também possui atuações mais lentas para faltas mais distantes, porém, apresentam pouca dispersão em termos de tempo de atuação devido em parte ao processamento mais rápido e por empregar ondas viajantes. Enfatiza-se ainda que o papel principal da TW32 é acelerar a emissão do permissivo no esquema POTT para o terminal remoto que, ao ser confirmado pela TD32, é permitido *trip* por comunicação.

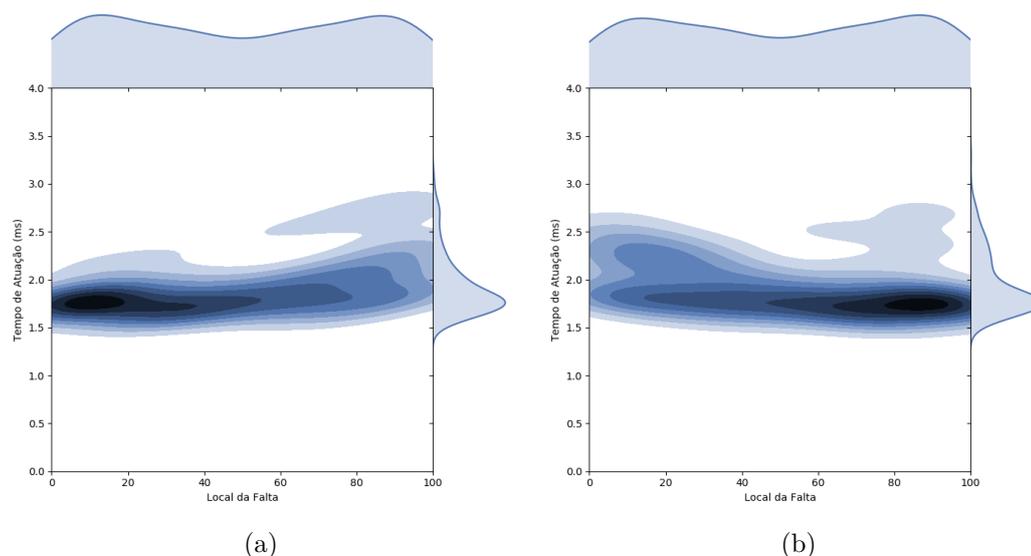


Figura 5.6. Densidade de probabilidade para TW87: (a)Tucuruí e (b) Xingu

Por fim, os resultados para a TW87 são apresentados da Figura 5.6. Nesse caso, os tempos de atuação estão concentrados entre 1.5 e 3 milissegundos sem latência do canal. Embora a tendência fosse de observar tempos de atuação reduzidos na metade da linha, o desempenho do mesmo é limitado por uma supervisão de sobrecorrente. Como a TW87 depende do compartilhamento de amostras entre os terminais em tempo real, seu tempo de atuação também é impactado pela ausência de um canal de comunicação com comprimento real. Vale ressaltar que a lógica não espera os dois terminais detectarem a falta, dado que o cálculo do diferencial por ondas viajantes é executado em ambas subestações das pontas das linhas, enviando DTT para o terminal remoto caso seja detectada uma falta interna.

Como demonstrado nos resultados apresentados, apenas a partir de uma quantidade significativa de cenários testados é possível entender de fato quais são os limites do esquema de proteção e adquirir algum esclarecimento sobre o desempenho esperado para uma aplicação. Portanto, a viabilização de tais análises está diretamente relacionada a simplicidade de uso do desenvolvimento proposto para testes no SEL-T400L em conjunto com ausência de custo adicional e também mantendo os critérios de fidelidade demandados pelo dispositivo.

5.2 APLICAÇÃO 2: AVALIAÇÃO ISOLADA

Esta análise apresenta a avaliação do elemento de distância, no domínio do tempo (TD21), do relé SEL-T400 para linhas de transmissão de circuito duplo. Embora seja amplamente difundido que elementos tradicionais de distância são afetados pelo acoplamento de sequência zero presente em linhas de transmissão de circuito duplo, o mesmo não é válido para a TD21, uma vez que tal análise da influência do acoplamento não é conhecida. Em razão das diferenças em princípios de operação e formulação, não é possível presumir que a influência será a mesma.

5.2.1 Linhas de Transmissão de Circuito Duplo

Linhas de transmissão de circuito duplo tem se mostrado como uma maneira eficiente de proporcionar aumento na capacidade de transmissão de potência, em conjunto com o compartilhamento de torres de transmissão e faixa de servidão. Por outro lado, a proximidade entre os circuitos aumenta a susceptibilidade a faltas e requer considerações adicionais no esquema de proteção, principalmente devido ao acoplamento mútuo entre circuitos (APOSTOLOV *et al.*, 2007).

Proveniente do acoplamento entre os fluxos magnéticos entre o circuito, esse acoplamento mútuo, se analisado em termos de componentes de sequência, nota-se que a influência de sequência zero é predominante, enquanto efeitos provenientes de sequência positiva e negativa podem ser desprezados. Portanto, por causa desse acoplamento entre os fluxos, durante faltas que envolvem a terra, corrente de sequência zero fluindo em um circuito induz tensão no outro circuito. Essa tensão induzida é diretamente proporcional à corrente de sequência zero fluindo em um dado circuito e a impedância mútua de sequência zero entre os circuitos. Vale ressaltar que a ordem de magnitude da impedância mútua de sequência zero pode ser da ordem de grandeza da impedância de sequência positiva da linha de transmissão (TZIOUVARAS *et al.*, 2014).

A depender da direção dos fluxos e, portanto, o sentido da corrente nos circuitos, a tensão induzida pode ser positiva ou negativa. Consequentemente, o acoplamento de sequência zero pode promover um aumento ou redução da tensão medida no terminal da linha de transmissão. Em geral, dada uma falta à terra em um dos circuitos, o sentido da corrente no circuito sem

falta é o fator predominante para determinar a polaridade e magnitude da tensão induzida que afetará o relé do circuito com falta (SANAYE-PASAND; SEYEDI, 2003).

O nível de contribuição de curto-circuito do sistema conectado nos terminais da linha de transmissão de circuito duplo é o fator principal para definir polaridade e magnitude da tensão induzida, pois altera justamente sentido e magnitude da corrente no circuito sem falta (SANAYE-PASAND; SEYEDI, 2003). Vale ressaltar que, quanto maior for a diferença em contribuição de curto-circuito entre os terminais da linha de transmissão de circuito duplo, maior será o efeito do acoplamento de sequência zero, pois maior será a corrente na linha sem falta.

Como resultado, essa tensão induzida proveniente do acoplamento influencia diretamente na operação de elementos de proteção que dependem de medições de tensão. Dessa forma, dependendo das condições de contribuição de curto-circuito do sistema elétrico ao redor da linha de transmissão de circuito duplo, confiabilidade e segurança podem ser comprometidos caso a concepção do esquema de proteção não considere esse efeito.

Com relação à proteção de linhas de transmissão de circuito duplo, elementos de distância continuam como os mais empregados. Contudo, o desempenho dos elementos de distância tradicionais é comprometido em razão do acoplamento de sequência zero (APOSTOLOV *et al.*, 2007). Alternativamente, elementos diferenciais tem sido adotados como uma solução, visto que não são afetados pelo acoplamento de sequência zero, porém ao custo de depender de um canal de comunicação. Como resultado, uma proteção de retaguarda, independente do canal de comunicação, continua sendo relevante para situações de perda de canal de comunicação e, por isso, a TD21 é analisada, ilustrando a aplicabilidade da ferramenta de teste desenvolvida nesse estudo.

5.2.2 Proteção de Distância de Linhas de Transmissão

Proteção de distância tradicional é baseada na estimação, indireta, da distância até a falta por meio do cálculo da impedância de sequência positiva aparente. O elemento é parametrizado com um alcance desejado em função da impedância de sequência positiva da linha de transmissão, de modo que o elemento é sensibilizado para faltas até o ponto de alcance ajustado. Assim como apresentado na Equação (5.1), tanto para elementos de fase ou de terra, a formulação

emprega fasores de tensão e corrente estimados pelo relé.

$$Z_{XT} = \frac{\hat{V}_X}{\hat{I}_X + \frac{Z_{LT0} - Z_{LT1}}{Z_{LT1}} \hat{I}_0} \quad Z_{XY} = \frac{\hat{V}_X - \hat{V}_Y}{\hat{I}_X - \hat{I}_Y}, \quad (5.1)$$

com Z_{XT} e Z_{XY} correspondendo às impedâncias estimadas para elementos de terra e fase, respectivamente, com X e Y sendo as fases envolvidas, \hat{V}_X e \hat{V}_Y são os fasores de tensão estimados para fases X e Y , enquanto \hat{I}_X e \hat{I}_Y são fasores de correntes, \hat{I}_0 é o fasor de corrente para sequência zero, Z_{LT0} e Z_{LT1} são as impedâncias de sequência zero e positiva, respectivamente, da linha de transmissão.

Por outro lado, embora também use o mesmo ajuste de alcance do elemento tradicional, proteção de distância no domínio do tempo não estima impedância até o ponto de falta nem emprega fasores para estimar a componente fundamental do sinal. Esse elemento utiliza grandezas incrementais para verificar variações de tensão no ponto de alcance para avaliar se a falta está dentro ou fora da zona de atuação (SCHWEITZER *et al.*, 2015). A tensão no alcance é calculada de acordo com a Equação (5.2):

$$V_{alcance} = V_{relé} - mZ_{LT1}I_Z, \quad (5.2)$$

sendo $V_{relé}$ a tensão medida pelo relé, m o alcance ajustado para o elemento, Z_{LT1} o módulo da impedância de sequência positiva da linha de transmissão e I_Z a chamada corrente réplica, responsável por remover a defasagem imposta pela característica indutiva da linha de transmissão, permitindo que o circuito seja percebido como resistivo e, portanto, facilitar a análise das relações de amplitude e polaridade entre os sinais (SCHWEITZER *et al.*, 2015).

Como a máxima variação de tensão possível na linha de transmissão ocorre em casos de falta franca, a tensão tende a zero, e a tensão de pré-falta no alcance, dada pela Equação 5.3, pode ser usada como grandeza de restrição. Assim, a grandeza de operação pode ser representada como a variação da tensão no ponto de alcance, sendo calculada por:

$$V_{op} = \Delta V_{relé} - mZ_{LT1}\Delta I_Z, \quad (5.3)$$

com $\Delta V_{relé}$ e ΔI_Z sendo tensão e corrente réplica incrementais no relé, respectivamente.

Como resultado, o princípio de operação dos elementos de distância é essencialmente o mesmo: determinação de uma zona de proteção baseada em um ajuste de alcance, sendo

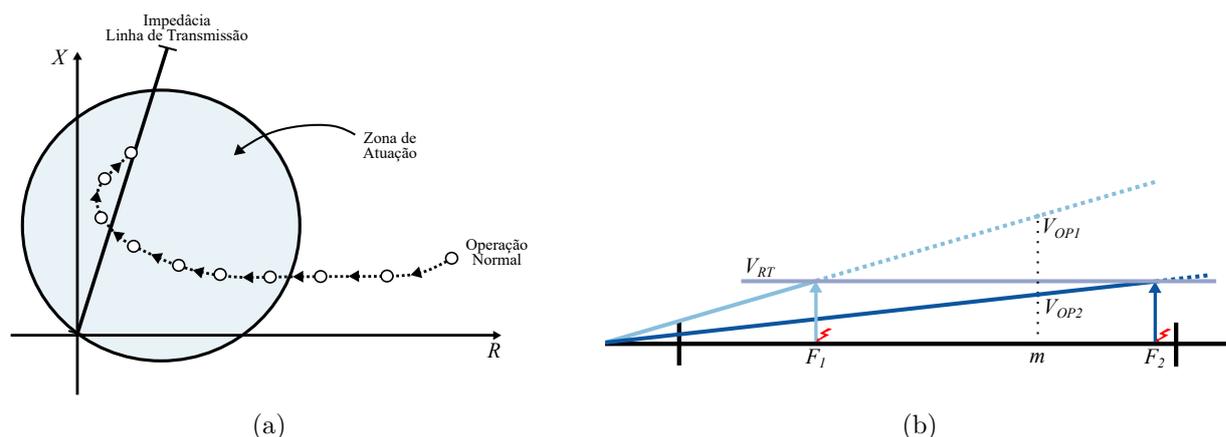


Figura 5.7. Características de operação para proteção de distância: (a) *mho* e (b) domínio do tempo

sensibilizado para faltas dentro da zona e insensível fora da zona, assim como apresentado na Figura 5.7.

No caso do elemento tradicional, Figura 5.7(a), é comum avaliar a impedância estimada no diagrama RX. Com a ocorrência de um curto-circuito, a impedância estimada move-se em direção a zona de atuação. Portanto, com a entrada da impedância estimada na característica, o relé envia o comando de *trip* para o respectivo disjuntor. Vale mencionar que, embora a Figura 5.7(a) apresente a característica *mho*, existem outras que podem ser empregadas dependendo da aplicação (ZIEGLER, 2011). A *mho* foi escolhida pois, em termo de parametrização no relé, é a que mais se aproxima do elemento no domínio do tempo (ajuste único de alcance da zona de atuação).

Para o elemento de distância no domínio do tempo, Figura 5.7(b), como supracitado, é empregada uma comparação de tensão no alcance para classificar o curto-circuito como estando dentro ou fora da zona. Se a tensão de operação calculada for menor que a de restrição, a falta é considerada como interna (F1), enquanto o contrário é válido para faltas fora da zona (F2). Por questões de segurança, a liberação do elemento é vinculada a uma lógica de detecção de distúrbios para evitar operação indevida em regime normal de operação, condições estáticas de carregamento e oscilação de potência (SEL, 2020).

Tipicamente, por questões de segurança, o alcance dos elementos de distância não é ajustado para cobrir a linha de transmissão por completo (COOK, 1985). É crucial que exista margem de segurança compatível com erros esperados como nas medições provenientes de transformadores para instrumento e imprecisões na estimativa dos parâmetros da linha de transmissão. De fato,

tradicionalmente, o alcance de elementos de distância tradicionais é ajustado entre 80% e 85%, enquanto para o elemento no domínio do tempo, de acordo com recomendação do fabricante, em 70% (HOROWITZ; PHADKE, 2008; SEL, 2020).

Conseqüentemente, a fim de prover proteção unitária da linha de transmissão, a única opção é associar os elementos de distância com esquemas de teleproteção, como DTT, já que elementos de distância não são sensibilizados para faltas além do alcance ajustado. Embora também seja de costume utilizar mais de uma zona de proteção com cobertura além da linha de transmissão protegida, estas são normalmente implantadas como retaguarda, atuando com atraso intencional. Vale ressaltar que, no caso da proteção de distância no domínio do tempo, não existe o conceito de múltiplas zonas, uma vez que seria contrário à concepção desse tipo de proteção que consiste em detectar faltas críticas em poucos milissegundos.

5.2.3 Procedimento de Teste

Como ambos elementos de distância descritos empregam tensão nos seus fundamentos, a tendência é que sejam influenciados pelo acoplamento de sequência zero. Contudo, o que se desconhece é se serão influenciados da mesma forma ou se as diferentes formulações e implementações práticas resultariam em diferentes impactos. A forma mais simples de verificar a influência do acoplamento de sequência zero é a cobertura real do elemento frente ao alcance parametrizado. Dessa maneira, o alcance do elemento de distância no domínio do tempo do SEL-T400L (TD21), será comparado com a cobertura da primeira zona (Z1G), usando característica *mho* do relé SEL-411L, sendo os dois elementos de proteção parametrizados para cobrir 70% da linha protegida.

A tensão induzida durante curtos-circuitos envolvendo a terra implica em uma estimativa da impedância diferente da correspondente da distância real até o ponto de falta para a proteção de distância tradicional. Analogamente, essa diferença também impacta na tensão de operação do elemento no domínio do tempo, resultando também em imprecisões comparadas com a posição real da falta. Vale ressaltar que, embora existam relés de proteção com elementos de distância que empregam compensação do acoplamento de sequência zero, como a TD21 não possui tal funcionalidade, optou-se por um elemento de distância tradicional sem tal compensação a fim de

manter o comparação mais próxima, uma vez que a finalidade da análise é entender se o impacto no alcance da TD21 seria necessariamente igual ao observado em um elemento tradicional de distância.

A fim de avaliar tal efeito no alcance em cada tipo de proteção, foi modelada, no ATP, uma linha de transmissão de circuito duplo real de 500 kV/60 Hz com 300 km como completamente transposta, com parâmetros distribuídos e considerando o acoplamento de sequência zero. A modelagem também inclui equivalentes do sistema elétrico conectado nos terminais da linha de transmissão, exemplificado na Figura 5.8. Com base nesse modelo, foram gerados um total de 297 eventos, divididos em três cenários diferentes de contribuição de curto-circuito dos equivalentes nos terminais da linha de transmissão. Todos os cenários possuem as mesmas condições:

- Variação do ponto de aplicação de falta de 3 km até 297 km em intervalos de 3km.
- Carregamento na linha de transmissão em 10 graus.
- Ângulo de incidência da aplicação da falta em 90 graus.
- Curto-circuitos monofásicos francos.

Cada cenário tem como objetivo alterar o fluxo de corrente (magnitude e sentido) na linha sem falta e, conseqüentemente, a tensão induzida devido ao acoplamento de sequência zero. Os equivalentes possuem duas opções de contribuição de curto-circuito: impedância ajustada em 0,1 (forte) e 10 (fraco) vezes da impedância total da linha de transmissão. Os cenários são

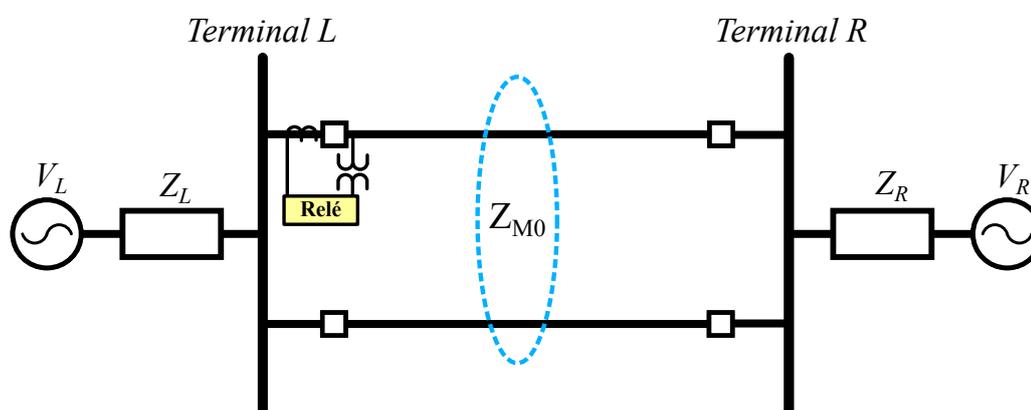


Figura 5.8. Exemplificação do sistema modelagem e posicionamento das medições usadas para reprodução nos relés.

construídos permutando esses valores entre os terminais da linha e mantendo um cenário com os dois terminais com contribuição forte.

Com relação a reprodução dos eventos nos relés, primeiramente, são gerados registros COMTRADE com frequência de amostragem em 1 MHz para todos os eventos desejados. O SEL-411L recebe os sinais por meio de um testador convencional (Doble F6150sv), reproduzindo os sinais analógicos diretamente nos terminais do relé, enquanto, para o SEL-T400L, emprega-se a versão para o *Digital Playback* desenvolvida em *Python*. Cabe ressaltar que são utilizadas estratégias diferentes justamente para atender aos requisitos de fidelidade necessário para cada relé.

5.2.4 Resultados

O objetivo das análises a partir dos cenários escolhidos é verificar o desempenho da TD21 comparada diretamente com a primeira zona do elemento de distância do SEL-411L em casos extremos de diferenças de contribuição de curto-circuito entre os terminais da linha de transmissão. Portanto, essa diferença traduz-se também em cenários opostos de influência do acoplamento de sequência zero, com polaridade positiva e negativa da tensão induzida. Como resultado, as conclusões obtidas podem ser extrapoladas para casos com condições intermediárias e promover direção com relação ao que é relevante avaliar para garantir confiabilidade e segurança nesse tipo de esquema que envolve elementos de distância e acoplamento.

Inicialmente, no entanto, é crucial verificar um cenário com a menor influência do acoplamento de sequência zero possível para ser usado como referência para mensurar a diferença em casos mais extremos. Para tanto, ambos equivalentes foram ajustados com a mesma contribuição de curto-circuito (forte), uma vez que, nesse caso, a corrente no circuito sem falta será a menor possível, sendo o curto-circuito na metade da linha a condição com menor tensão induzida pelo acoplamento.

Com uma falta na metade da linha de transmissão, o sistema é visto idealmente como simétrico pelos equivalentes, logo as correntes seriam iguais e a corrente no circuito sem falta seria baixa. Porém, ao deslocar a posição da falta, quanto mais distante da metade da linha de transmissão, maior será a diferença em impedância vista entre os equivalentes nos terminais,

resultando em correntes diferentes de contribuição. Além disso, o sentido da corrente no circuito sem falta também é invertido a media que a falta desloca-se pela metade da linha de transmissão. Logo, mesmo nessa configuração de equivalentes iguais, existirá desequilíbrios resultando em variações na tensão induzida pelo acoplamento (SANAYE-PASAND; SEYEDI, 2003).

Analisando os resultados do alcance dos elementos para esse caso, apresentado na Figura 5.9, ambos elementos aparentam influenciados pelo acoplamento de sequência zero, já que a cobertura real dos elementos de distância foi menor do que parametrizado (70%), sendo 50% para o tradicional (SEL-411L) e 61% para o domínio do tempo. Por outro lado, sabe-se que, a TD21 tende a reduzir sua sensibilidade para curtos-circuitos a medida que se aproximam do alcance (SCHWEITZER *et al.*, 2016). De fato, verificações anteriores em linhas de circuito simples demonstraram que o elemento tende a não ser sensibilizado para faltas a partir de 55%-60% da linha de transmissão protegida, para um alcance ajustado em 70% (CUSTÓDIO *et al.*, 2019).

Assim, embora os dois elementos estejam com o mesmo ajuste de alcance, a TD21 obteve cobertura adicional de 11% em comparação com a Z1G do SEL-411L. No que se refere ao tempo de atuação, assim como esperado, a TD21 é pelo menos 10 milissegundos mais rápida, com ambos elementos elevando seus tempos de atuação à medida que a falta se aproxima do

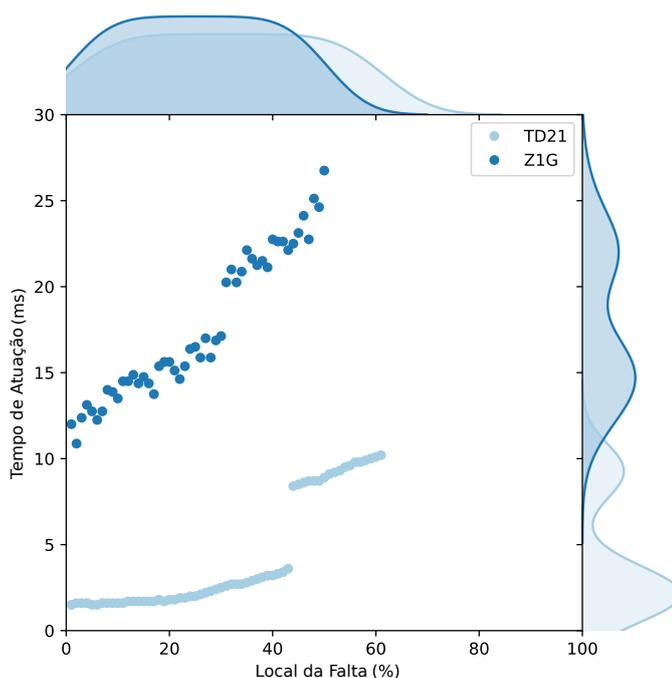


Figura 5.9. Comparação entre elementos de distância para o cenário base.

alcance ajustado. Vale ressaltar ainda que, ao observar a distribuição vertical dos tempos de atuação, a Z1G é mais dispersa, enquanto a TD21 é mais concentrada na sua região de atuação mais rápida, entre 1 e 4 milissegundos. O agrupamento dos pontos tem relação direta com o intervalo de processamento de cada relé, sendo 0.1 e 2 milissegundos para o SEL-T400L e SEL-411L, respectivamente, gerando diferentes níveis de variabilidade.

Como supracitado, embora exista alguma variação do efeito do acoplamento de sequência zero devido à mudança do local da falta, a situação de ter equivalentes iguais é apenas uma forma de ter um resultado de controle para as comparações com equivalentes diferentes, uma vez que dificilmente serão iguais na realidade. Assim, para obter conclusões mais realistas, é preciso investigar situações em que os equivalentes são diferentes.

O primeiro cenário com equivalentes diferentes é obtido mantendo a contribuição de curto-circuito no terminal L e reduzindo em 10 vezes a contribuição do terminal R. O resultado para os casos testados nessa configuração são apresentados na Figura 5.10. Comparando com o teste inicial, Figura 5.9, nota-se uma atuação parecida, contudo com mudanças no alcance. Os alcances da Z1G e TD21 passam de 50% para 43% e de 61% para 55%, respectivamente. Apesar da redução de alcance ter sido similar, a TD21 mantém um zona de cobertura maior.

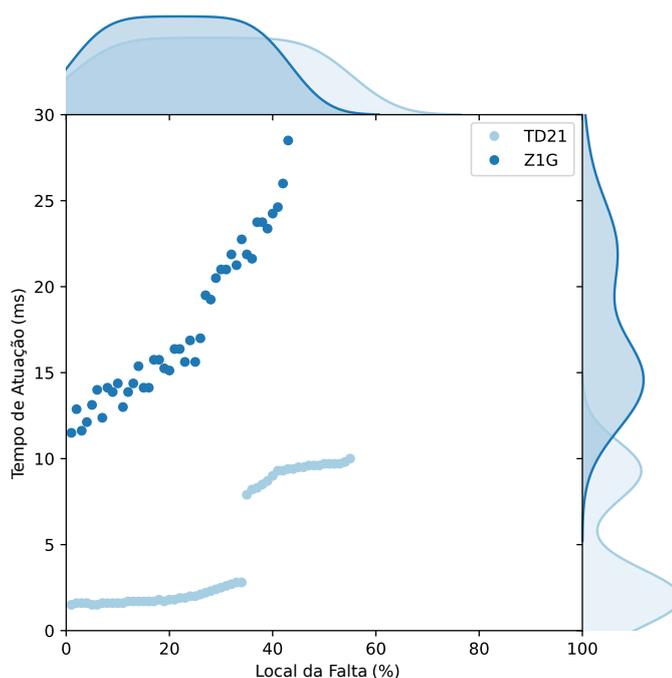


Figura 5.10. Comparação entre elementos de distância para o cenário base.

Por fim, para cobrir todos os cenários extremos, inverte-se a configuração de contribuição de curto-circuito entre os terminais, cujos resultados são apresentados na Figura 5.11. Nesse caso, o sentido da corrente no circuito sem falta é trocado em comparação com a configuração anterior. A partir da análise dos resultados de atuação para os casos testados, é evidente o sobrealcance promovido pela troca da contribuição dos equivalentes. A cobertura nesse caso foi similar, Z1G sendo sensibilizada para faltas até 95% e TD21 até 93%.

O tempo de atuação também apresenta mudanças significativa com relação aos cenários anteriores. A proteção de distância tradicional apresentou uma elevação substancial em tempo de atuação na maioria dos eventos. Até mesmo para faltas próximas ao relé, a Z1G detectou a falta em 20 milissegundos contra de 10 milissegundos, e atingindo 25 milissegundos apenas ao final do alcance real nos cenários anteriores. No caso do elemento no domínio do tempo, houve uma inversão nos tempos de atuação, detectando mais rapidamente para faltas após 60% da linha de transmissão. Além disso, há uma concentração maior de eventos na região de atuação mais lenta (10 milissegundos) ao contrário dos cenários anteriores.

Como demonstrado nos resultados apresentados, as diferenças de contribuição de curto-circuito alteram significativamente a tensão induzida pelo acoplamento mútuo e, portanto, afetam os elementos de distância tanto no domínio do tempo quanto tradicional. Contudo, os

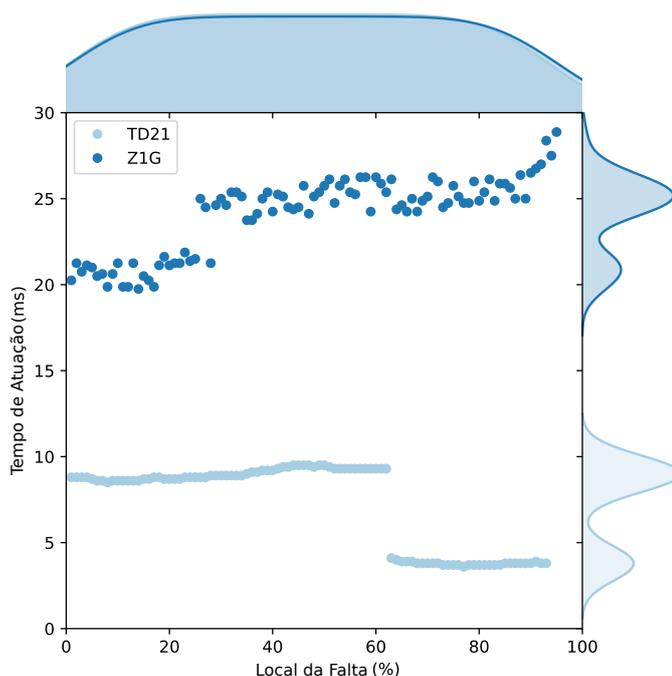


Figura 5.11. Comparação entre elementos de distância para o cenário base.

elementos possuem diferenças relevantes, principalmente em situações de subalcance.

De forma similar as conclusões obtidas para a aplicação sistêmica, apenas a partir de uma quantidade significativa de cenários seria possível entender de fato se simplesmente por usar tensão em sua lógica de proteção, o alcance da TD21 sofreria o mesmo impacto visto por um elemento de distância tradicional. Portanto, a viabilização de tais análises está diretamente relacionada ao desenvolvimento proposto para testes no SEL-T400L.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi apresentada uma ferramenta para testes no relé SEL-T400L e também exploradas as potencialidades traduzidas em viabilidade de novas análises. Para tanto, utilizou-se o *Python* como linguagem de programação para a implementação da lógica de testes suportada pelo relé, o que também permitiu o desenvolvimento de novos recursos e funcionalidades assim como ganhos em eficiência ao utilizar de uma forma mais eficaz o recurso disponível tanto do relé quanto do usuário.

As dificuldades encontradas atualmente para reprodução extensiva de eventos com fidelidade apropriada no SEL-T400L motivaram o desenvolvimento apresentado neste trabalho. De fato, devido às particularidades construtivas do relé e fundamentos dos elementos de proteção, inexistia uma solução econômica e simples para avaliar extensivamente o desempenho das funções como demandado em uma análise de aplicação. Além das particularidades de cada aplicação, tal fato é ainda mais relevante pela introdução considerada recente no mercado de dispositivos com fundamentos de proteção baseados em elementos transitórios ao invés de componentes fundamentais. Portanto, ainda não há um entendimento mais abrangente sobre a atuação desses elementos baseados no domínio do tempo.

Uma das vantagens do desenvolvimento apresentado é a total abstração da lógica interna de teste. Embora a implementação use recursos como *threads* e orientação ao objeto, não é exigido nenhum tipo de conhecimento sobre a arquitetura da aplicação nem sobre o funcionamento. Inclusive, para o usuário final, é como se o relé aceitasse diretamente arquivos normais do padrão COMTRADE. Vale ressaltar que os maiores ganhos em eficiência vieram da implantação de *threads* visto que todo o processo de teste é largamente dependente de espera por I/O.

O potencial da ferramenta de teste foi então apresentado na forma de dois tipos diferentes de avaliações para ilustrar também a versalidade dos tipos de testes suportados. Por meio de uma

quantidade significativa de cenários testados, em ambas análises foi possível extrair informações sobre o desempenho dos elementos e do esquema de proteção do SEL-T400L que não forneceriam a mesma visão geral caso não fossem testados extensivamente. Como demonstrado, qualquer variável interna presente no COMTRADE pode ser avaliada de forma similar, embora o foco neste trabalho tenha-se voltado diretamente para os elementos de proteção.

De fato, uma verificação similar poderia ser realizada nos localizadores de falta ou em variáveis intermediárias da lógica de proteção como limiares de sobrecorrente. Uma análise extensiva também poderia ser conduzida para verificar o ajuste necessário para atingir a sensibilidade desejada em qualquer elemento de proteção para um sistema em particular. O impacto dos ajustes nos elementos de proteção e localização também poderia ser abordado, uma vez que há considerável incerteza presente nos parâmetros estimados para linhas de transmissão.

Dessa maneira, os desdobramentos deste trabalho contribuem para um entendimento mais detalhado do desempenho do relé e até mesmo de sua parametrização. Como resultado, há benefício tanto na área de estudo e desenvolvimentos de novas funções como também para comissionamento e verificação de aplicabilidade de um relé para um dado sistema.

Como continuação dos desenvolvimentos realizados nesta dissertação, são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Implementação de uma interface gráfica a fim de evitar possíveis dificuldades com o uso da ferramenta;
- Interação com programas do tipo EMTP, em que os tempos de abertura dos disjuntores são reajustados de acordo com a atuação do relé;
- Desenvolvimento de um método para testes que incluam variações automáticas de ajustes dos elementos de proteção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Edital de Leilão no 004/2008-ANEEL, Anexo 6A à Lote A à Interligação Tucuruí à Macapá à Manaus: Trecho Tucuruí à Jurupari*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/>>. Citado na página 42.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório De Análise Desligamentos çados Do Sistema De Transmissão*. [S.l.], 2018. Citado na página 12.
- ALEXANDER, G.; ANDRICHAK, J. âcomparative testing using analog model power systems, digital model power systems and portable test sets. In: . [S.l.: s.n.], 1990. p. 1–25. Citado na página 8.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado na página 12.
- ANDO, M.; SCHWEITZER, E.; BAKER, R. Development and field-data evaluation of single-end fault locator for two-terminal hvdv transmission lines-part 2: Algorithm and evaluation. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 12, p. 3531–3537, 1985. Citado na página 19.
- ANDO, M.; SCHWEITZER, E.; BAKER, R. Development and field-data evaluation of single-eng fault locator for two-thermal hvdv transmission lines part i: Data collection system and field data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 12, p. 3524–3530, 1985. Citado na página 19.
- APOSTOLOV, A.; THOLOMIER, D.; SAMBASIVAN, S.; RICHARDS, S. Protection of double circuit transmission lines. In: IEEE. *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2007. p. 85–101. Citado 3 vezes nas páginas 46, 50, and 51.
- APOSTOLOV, A.; VANDIVER, B. Automated testing of communications based schemes in transmission line protection relays. In: IEEE. *PICA 2001. Innovative Computing for Power-Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society. International Conference on Power Industry Computer Applications (Cat. No. 01CH37195)*. [S.l.], 2001. p. 318–323. Citado na página 9.
- APOSTOLOV, A.; VANDIVER, B. Functional testing of iec 61850 based ieds and systems. In: IEEE. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004*. [S.l.], 2004. p. 640–645. Citado na página 9.
- BALL, R.; BERRESFORD, D.; CROOK, E.; SQUIRES, R. Interfacing between scada systems and substation communications networks. In: IET. *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.], 1993. p. 9–12. Citado na página 7.
- BECKMAN, E. J.; DEBEY, T.; MATTHEWS, R.; KARKI, B.; GANDHI, K. Advancements in technology and the challenges posed to electrical testing of protective relays and controls. In: IEEE. *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2016. p. 1–5. Citado na página 1.

- BENMOUYAL, G. Design of a digital multi-curve time-overcurrent relay. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 656–665, 1991. Citado na página 7.
- BEWLEY, L. Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 50, n. 2, p. 532–550, 1931. Citado na página 13.
- COOK, V. Analysis of distance protection: Research studies press ltd. 1985. Citado na página 53.
- CUSTÓDIO, E.; LOPES, F.; RIBEIRO, J.; HONORATO, T. Avaliação da influência da resposta transitória de tpcs sobre funções de proteção aplicadas nos domínios da frequência e do tempo. 2019. Citado na página 57.
- DESOER, C. A. *Basic circuit theory*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2010. Citado na página 15.
- DOMMEL, H. W. High speed replying using traveling wave transient analysis. *IEEE Publications*, IEEE PES Winter Power Meeting, p. 1–7, 1978. Citado na página 13.
- EASTVEDT, R. The need for ultra-fast fault clearing. In: *Third Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 1976. Citado na página 12.
- EPE. Plano decenal de expansão de energia 2008/2017. *MME, Brasília, DF*, v. 2, 2009. Citado na página 43.
- EPE. Plano decenal de expansão de energia 2026. *Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011b*, 2017. Citado 2 vezes nas páginas iv and 43.
- EPE. Plano decenal de expansão de energia 2029. *Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011b*, 2019. Citado na página 43.
- FRIEND, F.; JOHNSON, G.; MUGALIAN, B.; MICU, C.; SUFANA, C.; SIEW, C.; PATTI, C.; GOODRICH, D.; LUKACH, D.; PARKER, D. *et al.* Effect of distribution automation on protective relaying. In: IEEE. *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2014. p. 193–228. Citado na página 1.
- GREENWOOD, A. Electrical transients in power systems. New York, NY (USA); John Wiley and Sons Inc., 1991. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 14.
- GUZMÁN, A.; KASZTENNY, B.; TONG, Y.; MYNAM, M. V. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications. In: IEEE. *2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2018. p. 1–18. Citado na página 17.
- GUZMÁN, A.; SMELICH, G.; SHEFFIELD, Z.; TAYLOR, D. Testing traveling-wave line protection and fault locators. In: *proceedings of the 14th International Conference on Developments in Power System Protection, Belfast, UK*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 5 vezes nas páginas 2, 10, 11, 18, and 23.
- HENSLER, T.; PRITCHARD, C.; FISCHER, N.; KASZTENNY, B. Testing superimposed-component and traveling-wave line protection. In: *proceedings of the 44th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 5 vezes nas páginas v, 10, 11, 15, and 17.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power system relaying*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 54.

IEC. Iec 61850 â communication network nd systems in substations. *IEC*, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 9 and 22.

IEEE. Ieee standard common format for transient data exchange (comtrade) for power systems. *IEEE Std C37.111-1991*, p. 1–28, 1991. Citado na página 8.

IEEE. Ieee guide for power system protection testing. *IEEE Std C37.233-2009*, p. 1–124, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 11, 19, 20, 28, and 42.

IEEE. Ieee/iec measuring relays and protection equipment â part 24: Common format for transient data exchange (comtrade) for power systems. *IEEE Std C37.111-2013 (IEC 60255-24 Edition 2.0 2013-04)*, p. 1–73, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 and 34.

JODICE, J.; HARPHAM, S. 'end-to-end transient simulation for protection system performance testing'. In: IET. *Developments in the Use of Global Positioning Systems*. [S.l.], 1994. p. 6–1. Citado na página 9.

JOHNS, A. T.; SALMAN, S. K. *Digital protection for power systems*. [S.l.]: IET, 1995. Citado na página 13.

KEZUNOVIC, M.; ABUR, A.; SINGH, H.; SKENDZIC, V.; FROMEN, C.; SEVCIK, D. New test approach for microprocessor-based power system automation equipment. In: *MIDCON 90, Dallas, USA*. [S.l.: s.n.], 1990. Citado na página 8.

KEZUNOVIC, M.; GALIJASEVIC, Z. Pc based dynamic relay test bench. In: *International Conference on Modern Trends in the Protection Schemes of Electric Power Apparatus and Systems, New Delhi, India*. [S.l.: s.n.], 1998. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 8.

KEZUNOVIC, M.; REN, J.; LOTFIFARD, S. *Design, modeling and evaluation of protective relays for power systems*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 22.

KOBAYASHI, J.; OHURA, Y.; YUKI, M.; HASHISAKO, K.; SEO, K. The state of the art of multi-circuit and multi-terminal overhead transmission line protection systems associated with telecommunication systems. *CIGRE 1990 Session. Paper*, n. 34-201, 1990. Citado na página 7.

LOPES, F. V.; RIBEIRO, J. P. G.; HONORATO, T. R.; SILVA, K. M.; JR, J. N. R.; AVIZ, C. A.; FERNANDES, R. O. Time-domain relay performance evaluation considering brazilian fault cases. 2019. Citado na página 42.

MANN, B.; MORRISON, I. Relaying a three phase transmission line with a digital computer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 2, p. 742–750, 1971. Citado na página 6.

MANN, B. J.; MORRISON, I. Digital calculation of impedance for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 1, p. 270–279, 1971. Citado na página 6.

MARTI, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 1, p. 147–157, 1982. Citado na página 10.

- MCLAREN, P.; KUFFEL, R.; WIERCKX, R.; GIESBRECHT, W.; ARENDT, L. A real time digital power system simulator for testing relays. In: IEEE. *Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. [S.l.], 1991. p. 370–375. Citado na página 9.
- MORRISON, I. Prospects of on-line computer control in transmission systems and substations. *Elec. Eng. Trans. IE Australia*, n. 2, p. 234–236, 1967. Citado na página 6.
- ONS. Operação normal da área 500/230 kv manaus-macapá. *Manual de Procedimentos da Operação - Módulo 10 - Submódulo 10.21*, 2020. Citado na página 43.
- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. *Fundamentals of power system protection*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2011. Citado na página 12.
- PHILLIPS, D. *Python 3 object-oriented programming*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2015. Citado na página 30.
- PITT, V. *Penguin dictionary of physics*. [S.l.]: Penguin, 1977. Citado na página 15.
- ROCKEFELLER, G.; UDREN, E. High-speed distance relaying using a digital computer ii-test results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 3, p. 1244–1258, 1972. Citado na página 7.
- ROCKEFELLER, G. D. Fault protection with a digital computer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 4, p. 438–464, 1969. Citado na página 6.
- ROSSUM, G. Python reference manual. CWI (Centre for Mathematics and Computer Science), 1995. Citado na página 35.
- RUMMER, D.; KEZUNOVIC, M. Survey and classification of the digital-computer relaying literature. In: IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY â. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS*. [S.l.], 1980. v. 99, n. 1, p. 4–4. Citado na página 7.
- RUMMER, D. I.; KEZUNOVIC, M. A distributed processing microprocessor based hierarchically structured network (dmh) with applications to the control and protection of electric power systems. In: *ISMM Sixth International Symposium and Exhibition, MIMI*. [S.l.: s.n.], 1978. v. 78. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 7.
- SACHDEV, M.; ADU, T. *Design of a Dependable Microprocessor-based Relay for Transmission Line Protection*. [S.l.]: Canadian Electrical Association, Engineering and Operating Division, Power â, 1992. Citado na página 7.
- SANAYE-PASAND, M.; SEYEDI, H. Simulation, analysis and setting of distance relays on double circuit transmission lines. In: CITESEER. *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC*. [S.l.], 2003. p. 177–183. Citado 2 vezes nas páginas 51 and 57.
- SCHILLECI, J.; BREAUX, G.; KEZUNOVIC, M.; GALIJASEVIC, Z.; POPOVIC, T. Use of advanced digital simulators for distance relay design and application testing. In: *Texas A&M 54th Annual Relay Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.: s.n.], 2001. Citado na página 9.

- SCHWEITZER, E.; ALIAGA, A. Digital programmable time-parameter relay offers versatility and accuracy. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 1, p. 152–157, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 1 and 7.
- SCHWEITZER, E.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V.; GUZMAN, A.; FISCHER, N.; SKENDZIC, C. Defining and measuring the performance of line protective relays. In: *proceedings of the 43rd Annual Western Protective Relay Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 34, 46, and 57.
- SCHWEITZER, E. O.; GUZMÁN, A.; MYNAM, M. V.; SKENDZIC, V.; KASZTENNY, B.; MARX, S. Locating faults by the traveling waves they launch. In: IEEE. *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2014. p. 95–110. Citado na página 14.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. V. Speed of line protection-can we break free of phasor limitations? In: IEEE. *2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2015. p. 448–461. Citado 8 vezes nas páginas iii, 2, 13, 15, 16, 17, 18, and 52.
- SCHWEITZER, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-world faults. In: IEEE. *2016 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*. [S.l.], 2016. p. 1–17. Citado 3 vezes nas páginas 2, 10, and 42.
- SEL. Ultra-high-speed transmission line relay traveling-wave fault locator high-resolution event record - instruction manual. 2020. Citado 13 vezes nas páginas iii, v, 16, 17, 18, 19, 24, 26, 34, 35, 40, 53, and 54.
- SOUSA, W.; DIAS, A.; COSTA, C.; SANTOS, J.; NETO, V. Rede de oscilografias sapnet: análise de casos reais de perturbações em lts realimentando os procedimentos e algoritmos de localização de faltas. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, PR*, 2017. Citado na página 46.
- TZIOUVARAS, D. A.; ALTUVE, H. J.; CALERO, F. Protecting mutually coupled transmission lines: Challenges and solutions. In: IEEE. *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. [S.l.], 2014. p. 30–49. Citado na página 50.
- TZIOUVARAS, D. A.; HAWBAKER, W. D. Novel applications of a digital relay with multiple setting groups. In: *17th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 23–25. Citado na página 7.
- WERSTIUK, C. *The relay testing handbook# 2D: relay testing fundamentals*. [S.l.]: Valence Electrical Training Services LLC, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 7 and 8.
- YALLA, M. V. A digital multifunction protective relay. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 7, n. 1, p. 193–201, 1992. Citado na página 7.
- ZIEGLER, G. *Numerical distance protection: principles and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 53.