

Matheus Henrique Couto Bueno

**Ferramenta Automática para Diagnóstico das
Operações de Proteção de Distância em Linhas
de Transmissão**

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Julho de 2021

Matheus Henrique Couto Bueno

Ferramenta Automática para Diagnóstico das Operações de Proteção de Distância em Linhas de Transmissão

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE

Orientador: Alberto Resende De Conti

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Julho de 2021

B928f

Bueno, Matheus Henrique Couto.

Ferramenta automática para diagnóstico das operações de proteção de distância em linhas de transmissão [recurso eletrônico] / Matheus Henrique Couto Bueno. - 2021.

1 recurso online (155 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alberto Resende de Conti.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 149-155.

Bibliografia: f. 139-146.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Proteção - Teses. 3. Redes de petri - Teses. 4. Sistemas elétricos de potência - Teses. I. Conti, Alberto Resende de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Ferramenta Automática para Diagnóstico das Operações de
Proteção de Distância em Linhas de Transmissão"**

Matheus Henrique Couto Bueno

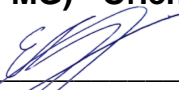
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 28 de julho de 2021.

Por:



Prof. Dr. Alberto Resende De Conti
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira
DEE (CEFET-MG)



Prof. Dr. João Ricardo da Mata Soares de Souza
DELCOM (CEFET-MG - Contagem)



Prof. Dr. Michel Bessani
(UFMG)

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Alexandre e Eliene, a minha irmã
Melissa e a minha companheira
Talitha por cuidarem de mim nos
momentos de maior fraqueza.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiro, aos profissionais de medicina intensiva do Hospital de Pronto-Socorro João XXIII e Mater Dei Contorno pelos cuidados nos momentos de maior fraqueza nessa jornada, sem os quais certamente não teria condições de finalizar este trabalho.

Ao Professor Alberto Resende De Conti, orientador do trabalho, agradeço por todo conhecimento transmitido, pela atenção, compreensão, paciência e suporte durante os momentos de dificuldade e pelos conselhos ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

O agradecimento mais importante vai para os meus pais, Alexandre e Eliene, e para minha irmã, Melissa. Aos meus pais, por toda apoio, confiança, cuidado e carinho durante os momentos adversos dessa jornada. À minha irmã, por todos conselhos, companheirismo e suporte, especialmente nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço especialmente à minha namorada Talitha, que me suportou em todas as minhas crises (e não foram poucas), esteve comigo nos meus piores momentos (de saúde ou não) e sempre buscou me mostrar o lado bom das coisas, mesmo que não conseguisse vê-los. Aproveito, ainda, para agradecer a compreensão por todos os momentos em que precisei ficar ausente e por todo carinho e afeto distribuídos nessa caminhada.

A todos os meus amigos, agradeço os momentos de descontração e as boas histórias que tornaram chegar até aqui mais fácil.

Aos colegas e amigos da Concert Technologies S.A., um abraço especial, por permitirem transformar meu mestrado na minha ocupação principal de trabalho, por apresentarem o desafio que motivou esse estudo, fornecer condições para realizá-lo e me colocar em contato direto com o principais interessados nos resultados dessa dissertação, para melhor entendimento do problema e das dificuldades associadas.

Por fim, agradeço a TAESA pelo suporte e recursos fornecidos durante todo desenvolvimento da solução apresentada. Em especial, agradeço a Cynthia, por resolver todas as pendências e impedimentos necessários para implementação do *software* desenvolvido, e ao Ronald, por subsidiar parte dos conhecimentos técnicos e de operação necessários durante esse trabalho. Aproveito também para agradecer pelo suporte e financiamento da pesquisa, através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL, registrada sob o código PD-07130-0048/2019.

“You’ve met with a terrible fate, haven’t you?”

- Happy Mask Salesman

The Legend of Zelda: Majora’s Mask

Resumo

O advento de novas tecnologias nos campos de automação e inteligência computacional têm contribuído para o crescente aumento de complexidade dos sistemas elétricos de potência (SEP). Embora esses recursos criem facilidades para a operação da rede elétrica, aumentando o entendimento situacional de seus operadores, eles introduzem também novos desafios às concessionárias de energia elétrica. Em especial, na ocorrência de uma falta, as equipes de engenharia são inundadas com um grande volume de informações geradas pelas telemetrias do circuito, dificultando o entendimento do estado operativo do sistema, a tomada de decisões adequadas de operação e a avaliação do evento. Por isso, este trabalho propõe uma metodologia para diagnóstico das operações da função de distância de dispositivos de proteção em linhas de transmissão, como *intelligent electronic devices* (IEDs), objetivando a simplificação das avaliações pós-faltas pelas equipes de engenharia e do processo de confecção de relatórios sobre a ocorrência para as agências reguladoras. Essa metodologia é desenvolvida utilizando uma técnica *model-based* com raciocínio de consistência, baseada na simulação de um comportamento de referência para os equipamentos em diagnóstico frente às condições da ocorrência e na comparação dos resultados desse processo com as informações extraídas de campo, em busca de inconsistências. Para tanto, as dinâmicas intrínsecas aos dispositivos de proteção de distância foram tratadas com *Redes de Petri Temporais Coloridas* (CTPNs), uma ferramenta matemática e gráfica para solução de problemas concorrentes, assíncronos, distribuídos e/ou estocásticos, e a comparação dos sinais simulados através de um *assessment score*, que combina diferentes técnicas de determinação de igualdade de forma de ondas através do uso de correlação cruzada e dos deslocamentos temporais entre sinais. A abordagem proposta habilita a avaliação de múltiplas formas de onda digitais de IEDs, ao mesmo tempo em que garante a robustez da análise frente às variações de parâmetros e configurações das redes elétricas. Ela foi validada por meio de simulações de transitórios eletromagnéticos no *Alternative Transient Program* (ATP) utilizando o sistema elétrico proposto pelo IEEE para teste de modelos de relés. Por fim, a abordagem desenvolvida foi utilizada, com sucesso, para avaliação de dois eventos reais de uma transmissora de energia elétrica, mostrando sua aplicabilidade em cenários práticos.

Palavras-chave: Redes de Petri Temporais Coloridas, Redes de Petri, correlação, diagnóstico de falta, proteção de sistemas elétricos, proteção de distância.

Abstract

New technologies related to automation and computer intelligence have caused the increase in complexity in power systems. Although those technologies help and facilitate the operation of power networks, enabling a greater situational awareness for system operators, they can introduce a plethora of new challenges to power utilities. During a fault, the engineering team can be flooded and overloaded with data from circuit telemetry, posing a difficulty for the power system state comprehension, the operational decision making and evaluation of the event. In this thesis a methodology is proposed for assessing distance protection relay operation in transmission lines, enabling the simplification of post-fault analysis and event reporting to the regulatory agencies. This approach is developed using a model-based technique with consistency reasoning to diagnose the system, built upon the simulation of a reference behavior for the equipment and the comparison of its results with data from the field, in search for inconsistencies. To enable this approach, the distance protection dynamic behavior has been reproduced using Colored Time Petri Nets (CTPN), a graphic and mathematical tool commonly used for concurrent, asynchronous, distributed and/or stochastic processes. A waveform comparison based on an assessment score calculation, combining different techniques for signal similarity determination, such as cross-correlation and temporal displacement among signals, is also proposed. The proposed methodology is able to evaluate multiple waveforms of on/off signals in intelligent electronic devices (IEDs) while granting robustness from system parameters or configurations variations. It was validated through electromagnetic transient simulations using the Alternative Transient Program (ATP) and IEEE's proposed network for relay model testing. To prove its capacities in evaluating real occurrences, it was used to analyze two events occurred in a transmission utility, presenting correct results.

Keywords: Colored time petri nets, correlation, fault diagnosis, petri nets, power system protection, distance protection.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura de IEDs e relés digitais modernos.	37
Figura 2 – Blocos funcionais de um relé a ser modelado para estudo de transitórios.	37
Figura 3 – Cenário de falta para determinação das grandezas de entrada da proteção de distância.	49
Figura 4 – Circuitos de sequência para o sistema da Figura 3.	49
Figura 5 – Cenário de falta fase-terra para determinação das grandezas de entrada da proteção de distância.	50
Figura 6 – Cenário de falta fase-fase para determinação das grandezas de entrada da proteção de distância.	52
Figura 7 – Representação funcional de comportamentos da proteção de distância no <i>diagrama R-X</i>	55
Figura 8 – Implementação de elementos de comportamentos da proteção de distância no <i>diagrama R-X</i>	56
Figura 9 – Exemplo de simulação de Rede de Petri.	60
Figura 10 – Exemplo de simulação de Rede de Petri.	70
Figura 11 – Conexões básicas entre transições e lugares em um modelo de proteção de distância em CTPN.	75
Figura 12 – Correlação entre as lógicas de operação da proteção de distância e CTPNs.	77
Figura 13 – Modificações das CTPNs para adição de funcionalidades extras em modelos de proteção de distância.	79
Figura 14 – Representação de operações lógicas <i>AND</i> e <i>OR</i> com redes de Petri.	80
Figura 15 – Exemplo de propagação de erro utilizada.	86
Figura 16 – Exemplo de sinal simulado <i>vs.</i> real consideradas as tolerâncias definidas.	88
Figura 17 – Funções sigmoide básica e modificada.	89
Figura 18 – Fluxograma descritivo da lógica de diagnóstico com as diferentes métricas.	93
Figura 19 – Modelo de IED utilizado no ATP para validação do sistema.	100
Figura 20 – Circuito de referência para testes de relés em programas do tipo EMTP.	102
Figura 21 – Solução proposta <i>vs.</i> ATP para impedância calculada pelo relé na Barras 1.	107
Figura 22 – Solução proposta <i>vs.</i> ATP para impedância calculada pelo relé na Barra 2.	107
Figura 23 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do <i>Terminal 1</i> para linha de transmissão de circuito simples.	111
Figura 24 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do <i>Terminal 2</i> para linha de transmissão de circuito simples.	112
Figura 25 – Comparativo de sinais operativos simulados <i>vs.</i> reais para o <i>Terminal 1</i> da linha de transmissão de circuito simples.	113

Figura 26 – Comparativo de sinais operativos simulados <i>vs.</i> reais para o <i>Terminal 2</i> da linha de transmissão de circuito simples.	114
Figura 27 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do <i>Terminal 1</i> para linha de transmissão de circuito duplo.	117
Figura 28 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do <i>Terminal 2</i> para linha de transmissão de circuito duplo.	117
Figura 29 – Comparativo de sinais operativos simulados <i>vs.</i> reais para o <i>Terminal 1</i> da linha de transmissão de circuito duplo.	118
Figura 30 – Comparativo de sinais operativos simulados <i>vs.</i> reais para o <i>Terminal 2</i> da linha de transmissão de circuito duplo.	119
Figura 31 – Impedância AT estimada para a falta em linha de transmissão em circuito duplo.	121

Lista de tabelas

Tabela 1 – Definição formal de Rede de Petri.	61
Tabela 2 – Representação matemática associada ao exemplo da Figura 9.	63
Tabela 3 – Definição formal de Rede de Petri Temporais Coloridas.	67
Tabela 4 – Definição de Conceitos em Rede de Petri Temporais Coloridas.	68
Tabela 5 – Definição de Habilitação em Rede de Petri Temporais Coloridas.	68
Tabela 6 – Representação matemática associada ao exemplo da Figura 10.	72
Tabela 7 – Cenários de falta utilizados para validação	104
Tabela 8 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e FFT Radix2 - 8 na Barra 1.	108
Tabela 9 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e DFT na Barra 1.	108
Tabela 10 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e FFT Radix2 - 8 na Barra 2.	109
Tabela 11 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e DFT na Barra 2.	109
Tabela 12 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no <i>Terminal 1</i> na linha de transmissão de circuito simples.	115
Tabela 13 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no <i>Terminal 2</i> na linha de transmissão de circuito simples.	116
Tabela 14 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no <i>Terminal 1</i> na linha de transmissão de circuito duplo.	123
Tabela 15 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no <i>Terminal 2</i> na linha de transmissão de circuito duplo.	124
Tabela 16 – Configuração da proteção de distância do <i>Terminal 1</i> para linha de transmissão de circuito simples.	139
Tabela 17 – Configuração da proteção de distância do <i>Terminal 2</i> para linha de transmissão de circuito simples.	139
Tabela 18 – Configuração da proteção de distância do <i>Terminal 1</i> para linha de transmissão de circuito duplo.	140
Tabela 19 – Configuração da proteção de distância do <i>Terminal 2</i> para linha de transmissão de circuito duplo.	143

Lista de abreviaturas e siglas

SEP	Sistema Elétrico de Potência
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
RDP	Registradores de Perturbações/Ocorrências
COMTRADE	<i>Common format for transient data exchange</i>
CTPN	Redes de Petri Temporais Coloridas
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
ASTA	<i>Automatic System Trouble Analysis</i>
DSS	<i>Decision Support System</i>
DAPPE	<i>Disturbance Analysis and Protection Performance Evaluation</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
DFS	<i>Depth-first search</i>
DS	<i>Displacement Score</i>
SS	<i>Similarity Score</i>
AS	<i>Assessment Score</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DUTT	Transferência de Disparo Direto de Subalcança

PUTT	Transferência de Disparo Permissivo de Subalcance
PUTT2	Transferência de Disparo Permissivo de Subalcance com Aceleração de Zona 2
POTT	Transferência de Disparo Permissivo de Sobrealcance

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Relevância	16
1.2	Objetivo	18
1.3	Metodologia	19
1.4	Contextualização	20
1.5	Organização do texto	20
2	HISTÓRICO DO PROBLEMA E ESTADO DA ARTE	22
2.1	Diagnóstico <i>Model-Based</i> e <i>Knowledge-Based</i>	22
2.2	Histórico do Problema	23
2.3	Estado da Arte	31
3	MODELAGEM DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	36
3.1	Modelagem de Relés para Análises Dinâmicas	36
3.2	Modelagem da Função de Proteção de Distância	39
3.2.1	Condicionamento de Sinais	40
3.2.1.1	Filtragem	41
3.2.2	Estimação de Fasor Fundamental	43
3.2.2.1	Método dos Erros Mínimos Quadrados	43
3.2.2.2	Aplicação à Estimação Fasorial	45
3.2.3	Métodos Numéricos	47
3.2.3.1	Determinação da Impedância no Caminho de Falta	48
3.2.3.2	Lógicas de Proteção	54
4	REDES DE PETRI TEMPORAIS COLORIDAS	58
4.1	Redes de Petri	58
4.2	Redes de Petri Temporais Coloridas	63
4.3	Modelagem de IEDs Utilizando CTPN	73
4.4	Vantagens e Limitações das CTPNs para Representação de IEDs	80
5	ABORDAGEM <i>MODEL-BASE</i>	83
5.1	Diferença Temporal Entre Ativações e Desativações	83
5.1.1	Propagações de Erros	84
5.1.2	Determinação das Diferenças Temporais	87
5.1.3	Função de Ativação e Normalização Temporal	88
5.2	Semelhança Entre Curvas	90

5.2.1	Correlação Cruzada	90
5.3	Cálculo dos Resultados Finais	91
5.3.1	Hierarquização de Métricas de Semelhança	92
5.3.2	Diagnóstico e Resultados Finais	95
5.3.3	Outras Configurações	96
6	VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA	99
6.1	Modelagem de IEDs no ATP	99
6.2	Circuito para Validação	101
6.3	Resultados	103
6.3.1	IED na <i>Barra 1</i>	105
6.3.2	IED na <i>Barra 2</i>	106
7	RESULTADOS PARA OCORRÊNCIAS REAIS	110
7.1	Linha de Transmissão em Circuito Simples	110
7.2	Linha de Transmissão em Circuito Duplo	115
8	CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	126
8.1	Propostas de Continuidade	128
	REFERÊNCIAS	130
	APÊNDICES	138
	APÊNDICE A – PARÂMETROS DE PROTEÇÃO PARA OCORRÊNCIAS REAIS AVALIADAS	139
A.1	Linha de Transmissão em Circuito Único	139
A.2	Linha de Transmissão em Circuito Duplo	140

1 Introdução

1.1 Relevância

O advento de novas tecnologias e ferramentas de comunicação, computação, ciência de dados e eletrônica, dentre várias outras, tem alterado constantemente os processos humanos, dotando-os de, cada vez mais, maiores exigências de qualidade dos produtos finais, menores custos financeiros, melhor performance computacional e maior assertividade em seus resultados (DING, 2008). Simultaneamente, sobretudo nos processos técnicos, verifica-se ainda o crescimento de sua complexidade, do volume de dados produzidos e manipulados e de seu grau de automação que, para atingir os critérios de performance, demandam sistemas mais robustos, seguros e confiáveis.

Todos os setores da sociedade estão sujeitos a essa constante necessidade de transformação contínua e digitalização. Para o caso do sistema elétrico de potência (SEP), essas exigências são guiadas pela existência de forças regulatórias e legais para que sejam atingidos critérios mínimos de desempenho e custo final ao consumidor, sob risco de multas e penalizações no caso de seu descumprimento.

No Brasil, todos os setores associados aos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece critérios, restrições e condições mínimas para garantir a segurança (pessoal e de fornecimento), confiabilidade e disponibilidade de ativos nas redes das concessionárias. Especificamente para a distribuição de energia elétrica, tem-se o módulo 4 dos Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição (PRODIST) (ANEEL, 2020b), responsável por tratar da segurança nas atividades de manutenção do sistema elétrico e legislar sobre acidentes de trabalho nessas atividades, enquanto o módulo 8 (ANEEL, 2021b) trata sobre as métricas de qualidade do serviço, disponibilidade de ativos e interrupções, estabelecendo penalizações no caso de seu descumprimento. Já na transmissão de energia elétrica, os critérios e métricas definidos são mais estritos e menos flexíveis, estabelecendo maiores penalizações para os descumprimentos das normativas existentes. Dentre essas normatizações, destacam-se o submódulo 9.2 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2021a), que legisla sobre indicadores de disponibilidade das funções de transmissão e geração, o submódulo 8.3 (ONS, 2021b), que estabelece penalidades sobre a indisponibilidade de ativos, e o submódulo 3.10 (ONS, 2021c), que discorre sobre os critérios da segurança operacional e de recursos do sistema elétrico.

Apesar do forte aparato regulatório e restritivo imposto ao setor, os agentes e concessionárias do sistema elétrico de potência nacional ainda colecionam indicadores

negativos, sobretudo os relacionados à segurança operacional dos processos e a confiabilidade do sistema. Particularmente, em relação à segurança pessoal dos trabalhadores, é constatada uma média de acidentes de trabalho (graves e mortes) 4,9 vezes superior aos outros setores da economia formal brasileira (DA SILVA, 2015), valor muito acima do desejado para setores altamente tecnológicos e passível de grande melhora. Além disso, verifica-se também um elevado volume de penalidades aplicadas às concessionárias do sistema por indisponibilidade de ativos e atraso de entrada em operação, entre outros. Apenas no ano fiscal 2019-2020, o montante de 405 milhões de reais de penalizações (ANEEL, 2021a; ANEEL, 2020a) foi aplicado aos agentes do sistema apenas na forma de Parcela Variável por Indisponibilidade, incidente sobre a indisponibilidade das funções de transmissão das concessionárias (ANEEL, 2016). Esse montante aponta para deficiências de confiabilidade do sistema e de sua robustez, fatores passíveis de grande melhora.

A avaliação desses dois indicadores, então, revela problemas críticos a serem sanados no sistema de energia elétrica: aumentar sua confiabilidade, disponibilidade e segurança (tanto profissional quanto de fornecimento de energia), mantendo, simultaneamente, a habilidade do sistema de evitar eventos catastróficos de falha. Tipicamente, a abordagem mais comum utilizada visando ao aumento de confiabilidade de qualquer sistema está associada à melhora de qualidade e robustez de suas partes constituintes, como sensores, atuadores, controladores ou computadores (DING, 2008), o que não é diferente para a rede elétrica. Para ela, isso equivaleria à constante modernização e melhora dos recursos e equipamentos dos circuitos através da substituição por outros mais robustos e seguros.

Contudo, por mais avançados que sejam os equipamentos utilizados, é impossível para essa abordagem assegurar a inexistência de comportamentos inesperados ou incorretos nos processos, quaisquer que sejam eles, incorrendo em problemas. Assim, é necessário buscar novos conjuntos de ferramentas e abordagens para verificar a existência de quaisquer situações anormais no sistema e as contornar, apontando na direção de metodologias de monitoramento e diagnóstico (DING, 2008). Nesse sentido, é evidente a necessidade de desenvolvimento de técnicas de diagnóstico de sistemas cujo objetivo seria determinar se todas as etapas de determinado processo ocorrem de maneira correta e adequada conforme suas configurações e peculiaridades.

Especialmente para os sistemas elétricos de potência, algumas áreas seriam altamente beneficiadas pela existência dessas rotinas de diagnóstico, sobretudo a de operação em tempo real e de análise pós-falha. Para os operadores de tempo real, cujo dia-a-dia envolve a execução manual de diagnósticos de falhas para restabelecimento do sistema (JEYASURYA et al., 1990), ferramentas desse tipo aumentariam sua consciência situacional, em especial para sistemas complexos e com grande volume de dados, e orientariam a tomada de melhores decisões para operação da rede, que contribuem para tornar a eliminação de falhas e o restabelecimento mais rápidos (JEYASURYA et al., 1990). Já

para os profissionais de pós-operação, ter o diagnóstico do comportamento de diversos dispositivos permite detectar os elos mais fracos, processos de maior variabilidade e com maior frequência de solicitação do sistema e que necessitam de maior atenção e recursos, como a parametrização e implantação de novas proteções, por exemplo. Assim, a existência de rotinas de diagnóstico pode contribuir na operação e no planejamento das redes elétricas nos seguintes sentidos: aumentar a consciência situacional dos operadores, reduzir o tempo e localizar especificamente os pontos de manutenção do sistema, melhor ajustar recursos e configurações de dispositivos, auxiliar estudos de planejamento, melhor gerir recursos para áreas mais frágeis da rede, entre vários outros.

Nesse sentido, é apresentado neste trabalho um sistema computacional cujo objetivo é realizar o diagnóstico do comportamento e da atuação das funções de proteção de distância em linhas de transmissão dotadas com dispositivos eletrônicos inteligentes (*Intelligent Electronic Devices* - IEDs) ou registradores de perturbações ou ocorrências (RDPs) em ambos seus terminais. Na metodologia desenvolvida, as formas de onda registradas por IEDs e RDPs durante um evento de falha são comparadas, de forma automatizada, com resultados produzidos por uma simulação do sistema de proteção para as mesmas condições de falta descritas, em uma abordagem *model-based*. Ela é validada através de simulações no *software Alternative Transient Program* (ATP), que possibilita o cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos e a aplicação de seus resultados em modelos genéricos de dispositivos de proteção de distância, fornecendo dados para alimentação da rotina desenvolvida. Por fim, o sistema desenvolvido foi utilizado para verificação de operações passadas na rede elétrica de uma transmissora, atestando sua eficácia.

1.2 Objetivo

O trabalho objetiva propor e implementar, em *software*, uma metodologia para realizar a avaliação e o diagnóstico das operações da proteção de distância de linhas de transmissão frente a ocorrência de uma falta para uso em tempo real. Essa solução deve ser generalizável, permitindo o diagnóstico de IEDs de diferentes modelos e fabricantes, parametrizável, habilitando a descrição de diferentes características e formas para as zonas de proteção, e independente, podendo ser integrada a sistemas existentes ou executada individualmente. Além disso, é desejável que as técnicas desenvolvidas possam ser aplicadas diretamente sobre os registros de forma de onda reais das redes elétricas de concessionárias. Por fim, todas as análises realizadas na ferramenta devem gerar resultados individuais por sinal de proteção e globais, descrevendo a atuação geral desses dispositivos de proteção.

1.3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho parte do levantamento e estudo do estado da arte para o diagnóstico das operações de proteção no SEP e em seus componentes, bem como os desafios e limitações encontrados nas técnicas mais difundidas para essas avaliações. Nessa etapa, são estudadas técnicas de escopo amplo para detecção de operações inadequadas no SEP, não restritas a trabalhos acadêmicos que investiguem apenas linhas de transmissão e suas proteções de distância. Pesquisam-se, também, as diversas abordagens computacionais para modelagem de relés, essenciais para a grande maioria das técnicas de diagnóstico das operações de proteção em sistemas elétricos. A partir desse arcabouço teórico, então, são apresentadas a metodologia desenvolvida e as etapas desse desenvolvimento, em sequência.

Inicialmente, são descritas e apresentadas as ferramentas básicas necessárias para representação das funções de distância de relés e IEDs em *software* para programas do tipo *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) utilizadas no trabalho. Nesse sentido, é explicada a técnica de estimação fasorial em frequência fundamental da rede aplicada na solução desenvolvida para cálculo das impedâncias de falta mensurada pelos IEDs, o método de erros mínimos quadrados para ajuste de curvas (SACHDEV; BARIBEAU, 1979). Apresentam-se, também, os modelos numéricos de comportamento e decisão de proteção dos relés, baseados nas impedâncias determinadas por estimação fasorial e nas expressões lógicas de decisão de *trip* dos dispositivos. Todos esses cálculos fazem uso apenas das informações de entrada de falta, que são pré-processadas por filtros condicionadores de sinais e conversores analógico-digital, também discutidos no trabalho.

Os modelos de IED apresentados, contudo, não descrevem os comportamentos dinâmicos dos dispositivos de proteção. Também não são capazes de associar as operações de relés nos dois terminais da linha de transmissão, não representando os efeitos mútuos entre essas proteções. Para contornar essas limitações, utiliza-se uma representação desse sistema em termos de redes de Petri Temporais Coloridas (CTPN), que habilitam a reprodução de comportamentos temporais e mútuos entre dispositivos, bem como as características lógico-sequenciais de seus processos, forçando que sejam avaliadas durante as simulações. Essa abordagem é base na rotina de diagnóstico das operações de proteção de distância em sistema de transmissão desenvolvida, sendo detalhada no trabalho.

De posse dos resultados de simulações com os modelos dinâmicos de relés, utiliza-se uma abordagem *model-based* para comparação entre os comportamentos esperados das proteções e suas operações em campo. Esse processo de comparação é realizado por técnicas matemáticas de avaliação de semelhança entre curvas, pelo uso da correlação cruzada e pela máxima diferença temporal entre os instantes de ativação e desativação de cada sinal digital descritivo de comportamento da proteção, que foram implementadas no *software* desenvolvido e habilitaram o diagnóstico das operações da função de distância em linhas de transmissão.

A metodologia desenvolvida para diagnosticar operações de IEDs frente a faltas no sistema de transmissão foi, então, validada através da realização de simulações utilizando o *software* ATP (HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019). Nele, foram calculados transitórios eletromagnéticos de curto-circuitos em rede elétrica de referência cujos resultados foram aplicados aos modelos genéricos de IEDs gerados na ferramenta, para cálculo da impedância estimada de falta vista pela proteção. As tensões e correntes dessas simulações foram, então, aplicadas na rotina desenvolvida para determinação das impedâncias calculadas, que foram comparadas com as obtidas com o ATP. Todo esses processos, bem como as configurações de proteção e o circuito elétrico utilizado, são apresentados no trabalho.

Por fim, com a metodologia proposta validada por simulação, a ferramenta desenvolvida é utilizada para avaliação de registros oscilográficos de eventos reais de uma transmissora, representando diferentes condições de falta, linhas de transmissão, parametrizações de proteções, modelos e fabricantes de relés. Com isso, verifica-se a robustez da solução proposta, sua capacidade de generalização para condições de falta e tipos de equipamento e a possibilidade de sua aplicação para avaliações de condições e esquemas de proteção reais. Espera-se, com isso, chegar a um processo de diagnóstico adequado e aplicável em concessionárias de energia elétrica, contribuindo em seus processos operacionais, de análise pós-falta e de manutenção.

1.4 Contextualização

Este trabalho é um dos resultados do projeto de pesquisa e desenvolvimento "Metodologia e Ferramenta para Análise Automática de Ocorrências Utilizando Algoritmos de Aprendizado de Máquina", financiado pela Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. (TAESA) com recursos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL (ANEEL, 2020c) sob o registro PD-07130-0048/2019. A execução e coordenação do projeto ficaram a cargo da Concert Technologies S.A., com o objetivo principal de desenvolvimento de ferramenta computacional integrada para diagnosticar ocorrências em concessões de transmissão de energia elétrica (TAESA, 2020).

1.5 Organização do texto

O texto deste trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, contando com este capítulo introdutório.

O **Capítulo 2** corresponde a uma revisão bibliográfica e ao levantamento do estado da arte no diagnóstico e validação de operações de proteção em dispositivos do tipo IED. Nele são abordadas as técnicas *model-based* comumente utilizadas para avaliar e comparar operações de proteção, bem como técnicas mais complexas *knowledge-based* que utilizam

conceitos de aprendizagem de máquina e sistemas especialistas para classificar atuações de relés como corretas ou incorretas.

Na sequência, no **Capítulo 3** são apresentadas as principais técnicas numéricas utilizadas para representação em *software* de IEDs em programas do tipo EMTP ou similares. Para tanto, discute-se o condicionamento dos sinais a serem utilizados como entrada para o modelo desenvolvido, detalhando a filtragem passa-baixa utilizada. Nele, ainda são apresentadas as técnicas utilizadas de erros mínimos quadrados de estimação fasorial em 60 Hz, as tensões e correntes selecionadas para o cálculo das impedâncias de falta e a lógica de decisão da proteção e ativação das zonas.

Os modelos de relés desenvolvidos não representam os comportamentos dinâmicos dos dispositivos reais, tampouco tem suas configurações de sequência e lógica de operação avaliadas. Para inclusão desses comportamentos, os IEDs também são representados utilizando em redes de Petri temporais coloridas, conforme apresentado no **Capítulo 4**. Nele ainda são trabalhadas brevemente as redes de Petri como ferramental necessário para compreensão de CTPNs, e é discutida a representação das lógicas programadas em IEDs, relés e esquemas de proteção com essas redes.

Com o modelo de IED configurado, uma abordagem *model-based* torna-se possível. Ela é explicada no **Capítulo 5**, juntamente com as técnicas utilizadas para comparação de sinais reais e simulados, os ajustes e correções realizadas e as funções de normalização utilizadas, que completam o processo de diagnóstico.

Tendo concluído o sistema para diagnosticar as operações de distância em linhas de transmissão, é necessário validá-lo. Esse processo é realizado através de simulações no ATP, conforme discutido no **Capítulo 6**. Nele, são apresentados os modelos de IED construídos e o circuito de validação utilizado, bem como os resultados obtidos pelo processo desenvolvido em comparação com os calculados pela ferramenta de cálculo de transitórios.

Uma vez atestado o funcionamento da solução proposta, é possível utilizá-la para avaliação de ocorrências reais, como feito no **Capítulo 7**. Com as oscilografias dos eventos registradas em formato *Common format for transient data exchange* (COMTRADE) e a parametrização das proteções de distância conhecida nos cenários de curto-circuito considerados, foi avaliada a capacidade de generalização e eficiência da solução proposta em cenários reais.

Por fim, no **Capítulo 8** são apresentadas as conclusões do desenvolvimento do trabalho, além de serem elencadas propostas de continuidade para a solução apresentada.

2 Histórico do Problema e Estado da Arte

Até o início da década de 1970 o termo *diagnóstico* esteve invariavelmente associado à medicina e ao reconhecimento de doenças com bases em sintomas (KORBICZ et al., 2003). É somente a partir desse período que o diagnóstico técnico, como uma área do saber, começa a ser desenvolvido (DING, 2008), expandindo as possibilidades de utilização dos conceitos de *diagnóstico* para estudos em outras áreas.

Diagnóstico é um termo derivado da palavra grega *diagnosis* cujo significado principal seria *reconhecimento* (KORBICZ et al., 2003). A palavra associada, *diagnostikós*, corresponde ao ato ou habilidade de reconhecer (KORBICZ et al., 2003). Assim, em sentido fundamental, *diagnóstico* representa a capacidade de reconhecer sintomas, características ou padrões já previamente observados com objetivo de avaliar o estado atual de um sistema (KORBICZ et al., 2003; NATKE; CEMPEL, 1997). Indo além, o diagnóstico de um sistema com atuação anormal consiste em localizar seus subsistemas que, operando incorretamente, explicariam os comportamentos observados (MOZETIČ, 1992; REITER, 1987). É essa a definição que é utilizada ao longo deste trabalho.

Tipicamente, a literatura divide a área de diagnóstico técnico em função da abordagem utilizada para resolução do problema. Assim, são dois os métodos mais comuns encontrados: diagnóstico por princípios fundamentais (*diagnosis from first principles*) e baseado em conhecimentos e empirismos (REITER, 1987). O desenvolvimento de ambas abordagens está fortemente entrelaçado, justificando a apresentação de ambos conceitos e a sua evolução histórica de modo combinado.

2.1 Diagnóstico *Model-Based* e *Knowledge-Based*

O diagnóstico por princípios fundamentais é também chamado de diagnóstico baseado em modelos ou *model-based*. Nessa abordagem, as únicas informações acessíveis são a descrição estrutural ou comportamental do sistema e observações de suas atuações reais (MOZETIČ, 1992), sem nenhum conhecimento prévio de falhas ou heurísticas de qualquer natureza. Comumente, as técnicas de raciocínio de *consistência* ou *abduativas* são empregadas nessas soluções (DAVIDSON; McArthur; McDonald, 2003).

Nas técnicas de *consistência*, usam-se apenas modelos de comportamento nominal do sistema, isto é, especificados para representar o processo em seu funcionamento correto. A esses modelos são aplicadas as mesmas condições do objeto em diagnóstico, através de simulações, cujos resultados são referências para comparação com os reais em busca de incongruências (DAVIDSON; McArthur; McDonald, 2003). Em contrapartida, os

raciocínios *abductivos* usam um conjunto de modelos de faltas previamente estabelecido a partir do qual se buscam resultados cujas lógicas são consistentes com os dados observados do sistema em diagnóstico (DAVIDSON; McArthur; McDonald, 2003).

Por sua vez, o diagnóstico por empirismo, baseado em conhecimentos ou *knowledge-based*, faz uso de heurísticas como instrumento para codificação de critérios-guia para solução do problema. Nesses métodos, as experiências passadas de especialistas humanos e suas intuições (REITER, 1987) são de grande importância no processo de diagnóstico. Diferentemente das abordagens *model-based*, nessa abordagem é representado o comportamento de um especialista humano na área de conhecimento do processo (MOZETIČ, 1992). Assim, sua acurácia dependerá do sucesso em codificar a experiência humana, sem que a estrutura ou comportamento do sistema real sejam estritamente representados (REITER, 1987). Uma classe desse tipo de abordagem são os sistemas especialistas¹, técnica pioneira no diagnóstico de processos (MOZETIČ, 1992).

2.2 Histórico do Problema

É apenas a partir da década de 1970 que as primeiras técnicas computacionais específicas para sistemas elétricos de potência começam a ser criadas, em especial aquelas associadas ao diagnóstico de faltas e das operações de proteção dos SEPs. É aproximadamente nesse período também que técnicas de ambas abordagens, *model-based* e *knowledge-based*, têm seus primeiros trabalhos publicados com aplicação em redes elétricas.

Nesse período, os recursos técnicos, especialmente os de comunicação e computacionais, eram escassos e não estavam amplamente disponíveis. Por isso, algumas das primeiras técnicas para avaliar as operações de proteção surgem antes mesmo dos IEDs, da digitalização dos centros de controle da rede e da difusão de computadores pessoais. É o caso do *Automatic System Trouble Analysis*, ou *ASTA* (DY LIACCO; KRAYNAK, 1969), desenvolvido em 1969 como um conjunto de ferramentas baseadas em lógicas de computação para detectar o funcionamento incorreto de relés e disjuntores.

Os procedimentos do *ASTA* podem ser utilizados com ou sem auxílio de computadores, visto que foram pensados para serem implementados apenas quando o poder computacional necessário estivesse disponível (DY LIACCO; KRAYNAK, 1969). Suas entradas são as configurações da rede e as operações de dispositivos de proteção durante os transitórios de falta, que alimentam rotinas de identificação dos trechos em falha e de determinação de operações incorretas em relés e disjuntores (DY LIACCO; KRAYNAK, 1969). Essa rotina tem como resultado um conjunto de operações que podem ser utiliza-

¹ Sub-área da inteligência artificial composta por programas computacionais que tentam capturar e utilizar técnicas de raciocínio naturais, particularmente os raciocínios heurísticos humanos, para simular o comportamento de especialistas na área de saber (TULIKDAR; CARDOZO; PERRY, 1986).

das pelos centro de controles para procedimentos como isolar a falta (se a operação for incorreta), por exemplo (DY LIACCO; KRAYNAK, 1969).

Embora o sistema *ASTA* se mostrasse visionário para a época em que foi pensado, é apenas com a difusão dos computadores das décadas de 1970 e 1980 que técnicas de avaliação da proteção da rede começaram a se tornar realidade (TULIKDAR; CARDOZO; PERRY, 1986). Impulsionado pelo aumento da performance dos dispositivos de estado sólido, tem-se também uma grande transformação nos equipamentos de proteção com os primeiros estudos e usos de sistemas microprocessados e computadores digitais para execução dessas funcionalidades. É o verificado em Hamilton, Legg e Patrickson (1967), em que o uso de dispositivos de proteção em estados sólido é comparado aos analógicos, e em Rockefeller (1969), que desenvolve um arcabouço de operações lógico-digitais para substituição de relés analógicos em subestações. Especialmente para a proteção de distância em linhas de transmissão, é a combinação desses dois fatores que permite o surgimento dos algoritmos de estimação de impedância (MANN; MORRISON, 1971a) e relés completamente digitais (MANN; MORRISON, 1971b; GILCREST; ROCKEFELLER; UDREN, 1971), apontando para o surgimento do que viria a ser chamado de IED.

Esses dois fatores foram fundamentais para a consolidação da área de diagnóstico técnico em sistemas de potência, sendo responsáveis também pela grande quantidade de algoritmos surgidos a partir da segunda metade da década de 1980.

Nessa década, diferentes métodos foram utilizados para modelagem com fins de diagnóstico do SEP nas abordagens *model-based* (SWARUP; CHANDRASEKHARAIHAH, 1991). Um deles consiste em expressar os comportamentos e a sequência de ações de relés e disjuntores como uma série de circuitos lógicos, utilizando portas *AND* e *OR* conectadas entre si, que poderiam ser diagnosticados com técnicas de circuitos digitais (MATSUMOTO; SAKAGUCHI; WAKE, 1985). Esses circuitos eram específicos para cada conjunto de proteções e recebiam como entrada variáveis binárias indicativas da atuação de relés e disjuntores. Produziam como saída as operações lógicas previstas para o esquema de proteção, obtidas através de uma variação de um processo de inferência indutiva (MATSUMOTO; SAKAGUCHI; WAKE, 1985) em que dados de campo eram aplicados ao modelo, produzindo saídas verificadas em busca de contradições com os dados reais. Não sendo encontradas contradições, o comportamento da proteção era dito correto.

Contudo, essa modelagem exige que todos os processos de um relé sejam representados em circuitos lógicos (SWARUP; CHANDRASEKHARAIHAH, 1991). Além disso, esses circuitos crescem rapidamente em dimensão, gerando custos computacionais elevados e exigindo uso de técnicas de simplificação (SWARUP; CHANDRASEKHARAIHAH, 1991). Buscando sanar esses problemas também com técnicas *model-based*, outras abordagens foram propostas, como as que utilizavam simulações do sistema de proteção apresentadas em Cardozo e Talkdar (1988). Nela, um conjunto de hipóteses é gerado a partir das

informações do sistema, que são verificadas com simulações utilizando modelos mistos com dados das configurações, proteções e conhecimento de especialistas no sistema (CARDOZO; TALKDAR, 1988). Caso os resultados simulados casem com as observações no SEP real, a hipótese é dita solução para o problema de diagnóstico. Caso contrário, novas hipóteses com novos erros no sistema serão geradas e simuladas, até que todas as possibilidades tenham sido avaliadas ou o resultado do diagnóstico seja atingido (CARDOZO; TALKDAR, 1988; SWARUP; CHANDRASEKHARAI AH, 1991).

Nessa abordagem, é necessário um bom nível de concordância entre os sistemas reais e as simulações que os representam nos cenários de falhas (SWARUP; CHANDRASEKHARAI AH, 1991), o que não é trivial, especialmente para funções e comportamentos complexos (CARDOZO; TALKDAR, 1988). Embora essas abordagens permitam a representação de relés complexos e com funções altamente especializadas, a dificuldade comum a ambas é a de execução do diagnóstico com dados parcialmente completos (SWARUP; CHANDRASEKHARAI AH, 1991), que, na época, só pôde ser contornado com algoritmos *knowledge-based*.

Um dos primeiros algoritmos de abordagem *knowledge-based* é proposto em Fukui e Kawakami (1986). Nesse trabalho é desenvolvido um sistema especialista em *Prolog* para estimar possíveis seções em falta com informações de relés de proteção e disjuntores (FUKUI; KAWAKAMI, 1986). *Prolog* é um motor de inferência especializado em cálculos de predicados de primeira ordem² utilizado para sintetizar causas a partir de dados do sistema real (consequências) (FUKUI; KAWAKAMI, 1986). Esse motor de inferência utiliza três bases de dados, uma com topologia da rede, outra com os esquemas de proteção e a última com heurísticas baseadas em experiência de operadores do sistema (FUKUI; KAWAKAMI, 1986), cujas informações são combinadas para cálculo de eventos e múltiplas falhas no sistema. Nessa metodologia, contudo, as heurísticas estão fortemente amarradas à configuração do circuito, que deve ser fixa, inviabilizando seu uso prático.

Uma alternativa a essa implementação e não limitada à topologia da rede é apresentada concorrentemente em Tulikdar, Cardozo e Perry (1986). Nela, um conjunto de ferramentas distribuídas para suporte a operadores é apresentada, destacando seu simulador de eventos discretos e seu "*diagnosticador*" (TULIKDAR; CARDOZO; PERRY, 1986). Ambos módulos são implementados em *OPS5*, linguagem similar ao *Prolog*, especializada em cálculos baseados em regras³.

O "*diagnosticador*" é um sistema especialista cujo propósito é identificar a perturbação inicial que desencadeou o evento e determinar erros de operação que tenham

² Conjunto formal de símbolos atômicos que podem ser associados para descrever relações lógicas do tipo consequência-causa (ADELSBERGER, 2003)

³ Representação, em sistemas especialistas, de conhecimento em termos de um conjunto de regras que determinam quais ações tomar para concluir situações distintas, sem utilizar de descrições estáticas, declarativas ou conjunto de condições verdadeiras (GROSAN; ABRAHAM, 2011)

desencadeado modificações de configuração da rede (TULIKDAR; CARDOZO; PERRY, 1986). Ele é composto por um construtor de hipóteses - que cria eventos de falha - e um identificador de hipóteses - responsável por classificar e especificar (com informações adicionais) cada uma delas - que, em conjunto, determinam aquela que melhor representa a situação em mãos (TULIKDAR; CARDOZO; PERRY, 1986). Caso os resultados processados pelo "diagnosticador" não sejam conclusivos ou haja divergências com operadores, ele é capaz de invocar o simulador para avaliação do evento (TULIKDAR; CARDOZO; PERRY, 1986).

Apesar de robustas, as soluções *knowledge-based* encontravam limitações para avaliação de sistemas e eventos complexos, sobretudo ocorrências inéditas, dado que nenhuma regra poderia ter sido elaborada para elas (SWARUP; CHANDRASEKHARAI, 1991). Juntamente com as limitações de sistemas *model-based*, de poder computacional e de comunicações da época, os algoritmos de diagnóstico em SEP ainda apresentavam grande espaço para melhoras e novas abordagens, propostas nas décadas seguintes.

Com o crescimento do poder computacional, a década de 1990 foi marcada por abordagens mais complexas para diagnóstico em SEP. É nesse período que as primeiras técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais artificiais⁴ são utilizadas para contornar as limitações de soluções *knowledge-based* anteriores, através de sua capacidade de generalização e aprendizado com situações inéditas (SEKINE et al., 1992). Isso é apresentado em Sekine et al. (1992), que conceptualiza uma rede neural para identificação de padrões de falta nos estados das chaves dos circuitos.

Nessa abordagem, múltiplas redes neurais classificadoras foram desenvolvidas para detectar padrões de falha nos elementos individuais do sistema (disjuntores, relés, entre outros) e alimentar a rede responsável pelo diagnóstico do circuito (SEKINE et al., 1992). Ela se destaca pelo seu baixo custo computacional e viabilidade de uso em tempo real (seu cálculo envolve apenas multiplicações de matrizes e aplicação de funções de ativação (SEKINE et al., 1992)), pela sua capacidade de generalização e por possibilidade de aprendizagem em situações completamente desconhecidas.

Contudo, para que se mantenham as vantagens dessas redes, é necessário realizar seu treinamento a partir de base de dados representativa de eventos de falha possíveis para o circuito, que teria sido gerada por simulações do SEP em diversas condições de falta (SEKINE et al., 1992). Esses dados de treinamento geram limitações a essa abordagem, visto que dependem da topologia da rede elétrica, não sendo trivial gerar conjuntos representativos de falhas para as diversas configurações do sistema. Assim, embora eliminasse a necessidade de criação de regras para cada evento, novas dificuldades

⁴ Sistema computacional inspirado em redes neurais biológicas que opera como um aproximador universal de funções (WANG, 2003). Sua unidade básica é um elemento de processamento que mapeia o espaço N -dimensional de suas entradas em um espaço M -dimensional de saída (SEKINE et al., 1992), através da relações não-lineares (WANG, 2003; SEKINE et al., 1992).

foram introduzidas, que exigiriam métodos mais robustos para solução.

Apesar do advento das soluções com redes neurais artificiais, abordagens *knowledge-based* com sistemas especialistas continuaram a ser desenvolvidas, com introdução de novas abordagens, dados e heurística visando ao aumento de sua performance. É o caso apresentado em [Kezunovic et al. \(1993\)](#), em que foram utilizadas formas de ondas registradas por IEDs e RDPs do evento como entradas da solução. Para viabilizar essa abordagem, técnicas de processamento de sinais foram utilizados para extração dos parâmetros relevantes dos sinais, que, juntamente com informações de comunicações de relés e disjuntores, foram usadas para analisar o evento por um sistema especialista ([KEZUNOVIC et al., 1993](#)).

Esse sistema foi desenvolvido em *CLIPS*, ferramenta computacional de inferência baseada em regras, com capacidade de registrar todos os raciocínios realizados para conferência futura ([KEZUNOVIC et al., 1993](#)). Seu grande diferencial, contudo, foi o melhor critério de diagnóstico dos circuitos, dado que as operações de relés e disjuntores estão intimamente associadas a mudanças em sinais analógicos dos IEDs e RDPs, o que melhorou a qualidade da análise e reduziu seu custo computacional ([KEZUNOVIC et al., 1993](#)).

O uso de registros oscilográficos de IEDs e RPDs também encontrou espaço em abordagens *model-based* nesse período, principalmente pelos trabalhos de [McArthur et al. \(1995\)](#), em que foi desenvolvido um sistema de suporte a decisões (*Decision Support System, DSS*) para uso por engenheiros na ocorrência de faltas. Dentre as funcionalidades da ferramenta, destaca-se o módulo de validação das operações de proteção, construído por diagnóstico por princípios fundamentais ([McArthur et al., 1996](#)).

Nele, um modelo (matemático, lógico, funcional ou dinâmico ([McArthur et al., 1996](#))) das características operacionais de um relé é submetido aos registros analógicos de IEDs e RPDs para determinação de operações esperadas para a proteção, que são comparadas às reais por um mecanismo de raciocínio baseado em consistência⁵ de uma ferramenta geral de diagnóstico ([McArthur et al., 1995](#); [McArthur et al., 1996](#); [McArthur et al., 1996](#)). Essa abordagem permite a representação de configurações de proteção complexas, com modelos hierarquizáveis (com subcomponentes) e extensíveis pelo desacoplamento entre o diagnóstico e os modelos ([McArthur et al., 1996](#)). Limita-se, contudo, na capacidade de modelagem do processo para os eventos de interesse, o que nem sempre se mostra possível.

Esse trabalho se mostrou frutífero, culminando no desenvolvimento de um conjunto de ferramentas (*toolset*) e um *framework* para diagnósticos *model-based* por [Davidson, McArthur e McDonald \(2003\)](#), já nos anos 2000. Nesse período, contudo, poucos são os

⁵ Método de raciocínio dedutivo com subconjuntos consistentes selecionados a partir de uma base de conhecimentos com inconsistências ([TAHARA; NOBESAWA, 2006](#)).

registros de uso desse tipo de abordagem, sendo a década dominada quase exclusivamente por técnicas *knowledge-based*. Esse aumento de popularidade relaciona-se intimamente com o contexto do período, em que as aplicações de inteligência artificial passam a dominar o debate público e científico, especialmente após o sistema *Deep Blue* se tornar o primeiro computador a derrotar um multicampeão de xadrez, Gary Kasparov, em 1997 (BUCHANAN, 2006), marco disruptivo para essas tecnologias.

Dentre essas abordagens *knowledge-based*, destaca-se o grande uso de lógica nebulosa ou *fuzzy*⁶ para tratamento de informações ambíguas ou imprecisas nos processos de diagnóstico. Esse tipo de raciocínio lógico foi combinado principalmente com técnicas de redes *causa-efeito* e *Petri* para tratamento e manipulação de dados.

As redes *causa-efeito* são ferramentas de modelagem gráfica que relacionam causas a efeitos por grafos (CHIN, 2003). Seu uso para diagnóstico em SEP se deu através dos trabalhos de Chen, Liu e Tsai (2000) e Chin (2003), em que foram utilizadas para representar a associação entre faltas e os relés e disjuntores atuados. Nessas abordagens, são criados candidatos de falta com base em três tipos de nós (correspondentes à seção em falta, ações de relés e atuação de disjuntores (CHIN, 2003; CHEN; LIU; TSAI, 2000)) que são relacionados por lógica *fuzzy*. A eles são atribuídos valores e critérios (CHEN; LIU; TSAI, 2000) ou relações (CHIN, 2003) que indiretamente os associam às probabilidades de operação corretas, incorretas ou falhas para a situação candidata, a partir da qual se determinam os componentes em situações atípicas com base nos valores máximos de seus processos nebulosos (CHEN; LIU; TSAI, 2000; CHIN, 2003).

Esse uso das redes *causa-efeito* habilitou que a ferramenta desenvolvida fosse rápida e de baixo custo computacional, robusta para trabalhar com dados e informações incertas e de fácil manutenção de sua base de dados (CHEN; LIU; TSAI, 2000; CHIN, 2003). Especialmente, destaca-se a natureza gráfica do modelo, que permitiu a visualização de forma simples das relações entre os componentes em falha e proteções (CHEN; LIU; TSAI, 2000), das etapas do processo de inferência e dos conhecimentos embutidos na ferramenta. Nesse sentido, essas soluções se mostram muito próximas àquelas baseadas em redes de *Petri*, especialmente pela capacidade de exibição gráfica e simples de seus resultados.

De forma semelhante, as redes de *Petri* e sua variante com lógica *fuzzy* são técnicas de modelagem gráfica que relacionam eventos e recursos (materiais ou informações) através de grafos (SUN; QIN; SONG, 2004), sendo apresentadas em detalhe na seção 4.2. Por isso, as soluções em Sun, Qin e Song (2004) e Luo e Kezunovic (2008) guardam grandes semelhanças com as técnicas de *causa-efeito*, mas se diferem em alguns pontos importantes, principalmente em relação ao arcabouço teórico de álgebra matricial e conjuntos usados

⁶ Sistema de lógica multivariável em que uma proposição p pode ser dita *verdadeira*, *falsa* ou ter valor intermediário qualquer dentro de um conjunto, diferenciando-se de sistemas bivariáveis (como na lógica booleana) onde p pode ser dita **apenas** *verdadeira* ou *falsa* (ZADEH, 1988).

nas redes de *Petri* (LUO; KEZUNOVIC, 2008). Essas características garantem habilidades de análise e processamento concorrente e paralelo, melhorando a performance e o custo computacional desse tipo de implementação (SUN; QIN; SONG, 2004).

Em Sun, Qin e Song (2004), o aspecto *fuzzy* é representado nos *marcadores* das redes de *Petri*, que são definidos pelo usuário de acordo com os esquemas de proteção e prioridade de *trip* de relés e disjuntores (SUN; QIN; SONG, 2004). A esses *marcadores* são associados valores representativos das confiabilidades de cada equipamento ou processo no sistema. Assim, eles são atualizados conforme a ocorrência de processos e fluxo na rede até determinação de seus estados finais, momento em que os valores *fuzzy* são utilizados para determinar o cenário mais provável de falha (SUN; QIN; SONG, 2004).

De forma semelhante, o diagnóstico é executado em Luo e Kezunovic (2008). Nesse caso, as principais diferenças estão associadas ao uso de média ponderada de múltiplos fatores para determinação dos valores *fuzzy* de cada evento (LUO; KEZUNOVIC, 2008), o processo automático para construção da menor rede possível e a rígida implementação matricial, que conferem grande performance e baixo custo computacional a essa solução (LUO; KEZUNOVIC, 2008). O preciosismo matricial garante a resolução concorrente de múltiplos eventos na rede, habilitando tempo computacional reduzido e soluções com múltiplas faltas simultâneas (LUO; KEZUNOVIC, 2008).

Contudo, todas essas metodologias apresentaram limitações, principalmente relacionadas à determinação de relações *fuzzy* e da necessidade de definição de variáveis e valores pelo usuário, sobretudo de confiabilidade de equipamentos e processos (SUN; QIN; SONG, 2004; LUO; KEZUNOVIC, 2008), o que é tipicamente não trivial. Por isso, outras abordagens *knowledge-based* continuaram a ser apresentadas, reciclando técnicas já utilizadas, como redes neurais artificiais, ou apresentando novas, com destaque para aquelas utilizando teorias de otimização.

Nessas abordagens, o diagnóstico de um sistema é formulado como um problema de programação inteira⁷, convertendo-o para um problema de determinação de valores extremos (LIN et al., 2010). Nessa formulação, os componentes de circuito assumem valores binários (0 ou 1) conforme seu estado (aberto/fechado, operante/não operante, entre outros) e, com técnicas de otimização, busca-se a combinação de valores 0 e 1 de componentes tal que, quando aplicada a função objetivo junto a observações reais (alarmes, oscilografias, entre outros), resultam no valor máximo ou mínimo da expressão (dependendo da função objetivo usada) (LIN et al., 2010; GUO et al., 2010).

Embora utilizem a mesma formulação para o problema de diagnóstico, as soluções por otimização tipicamente utilizam funções objetivo específicas e proprietárias que levam

⁷ Problema de otimização matemática em que parte ou todas as variáveis assumem apenas valores inteiros, podendo ser chamado de problema de programação inteira linear se todas as variáveis forem admitidas lineares (CONFORTI; CORNUÉJOLS; ZAMBELLI, 2014).

em conta os comportamentos de interesse para cada diagnóstico. Ainda, é comum que cada trabalho empregue métodos distintos para solução do problema de otimização, sendo o caso do trabalho de [Guo et al. \(2010\)](#) e de [Lin et al. \(2010\)](#), em que são utilizados busca tabu ([GUO et al., 2010](#)) e uma combinação de algoritmos genéticos com busca tabu ([LIN et al., 2010](#)), respectivamente.

Tanto a busca tabu quanto os algoritmos genéticos são abordagens heurísticas para otimização de funções objetivo. Na busca tabu, um processo iterativo percorre o espaço possível de soluções em direção aos pontos ótimos, impedindo movimentos em sentido reverso (já previamente avaliados) através do uso de uma estrutura de dados, a lista tabu, em que movimentos proibidos são registrados ([SARKER; NEWTON, 2008](#)). Essa propriedade reduz as chances de que a solução fique presa em mínimos locais, dado que são impossibilitados movimentos de ciclagem em torno de ótimos locais ([GUO et al., 2010; SARKER; NEWTON, 2008](#)). Essa tecnologia foi aplicada, de maneira pura, em [Guo et al. \(2010\)](#), sendo sua capacidade de evitar mínimos locais explorada em [Lin et al. \(2010\)](#) juntamente com algoritmos genéticos.

Algoritmos genéticos são soluções estocásticas para problemas de otimização baseadas nas ideias biológicas de evolução e adaptação ([SARKER; NEWTON, 2008](#)). Nessa abordagem, é gerada aleatoriamente uma população cujos indivíduos são avaliados pela sua capacidade de solucionar o problema. Alguns deles, na próxima etapa, são escolhidos para formar duplas sujeitas a cruzamentos, isto é, geram um novo indivíduo com características combinadas dos elementos da dupla. Sobre eles, podem ainda ser aplicadas, randomicamente, mutações que alteram seus parâmetros, de forma a gerar uma nova população de indivíduos ([SARKER; NEWTON, 2008](#)). Esse novo conjunto é, então, avaliado para solucionar o problema, reiniciando o ciclo até que os critérios de parada sejam atingidos. Assim como a busca tabu, a solução pode, também, ficar retida em ótimos locais, o que se tenta contornar com a aplicação de mutações aos indivíduos da população. Isso garante que a frequência de convergência e retenção nesses pontos ótimos locais seja reduzida, apresentando vantagens em relação a busca tabu. Ainda, essa abordagem tipicamente gera uma solução para o problema de forma mais rápida que a busca tabu, mesmo que esses resultados encontrados não correspondam ao melhor ponto no espaço da solução ([LIN et al., 2010](#)).

Dadas as características desses métodos, [Lin et al. \(2010\)](#) propõem a sua utilização mista, para garantir que a solução global seja atingida (por busca tabu) de maneira rápida através de algoritmos genéticos. Embora tanto essa abordagem sofisticada quanto a versão mais simples de otimização de [Guo et al. \(2010\)](#) consigam resolver grande volume de problemas, incluindo os de outras soluções do período, ainda apresentavam limitações. Mais especificamente, não era possível garantir a convergência em baixo tempo computacional de seus processos heurísticos ([LIN et al., 2010; GUO et al., 2010](#)), o que poderia levar

a análises incorretas ou soluções incompletas. Assim, abre-se caminho para uma grande gama de novas abordagens, que viriam a ser apresentadas e desenvolvidas nas décadas seguintes.

Todas as soluções apresentadas até agora se encarregam de tratar do sistema elétrico inteiro, em busca de componentes e seções em falhas que possam explicar eventos anormais nele verificado. Até então, o foco das soluções não era no diagnóstico das proteções de linhas de transmissão, muito menos nas operações de seus relés, panorama esse que começará a ser alterado na década seguinte. Apesar disso, muitas (novas) abordagens para diagnóstico de SEP ainda são produzidas e encontradas na literatura, como também será verificado nesse próximo período. Essas técnicas mais modernas são apresentadas na [seção 2.3](#).

2.3 Estado da Arte

Grande parte dos avanços mais recentes nas abordagens de diagnóstico para SEP estão associados a técnicas *knowledge-based* e suas aplicações. Por isso, ainda são encontradas muitas soluções utilizando lógica *fuzzy* e redes de Petri, tratando o tema como um problema de otimização ou aplicando redes neurais artificiais. É recente também o aumento no número de publicações de diagnóstico em subsistemas ou elementos do SEP, principalmente através de extensões de metodologias *knowledge-based* e *model-based*. Essas tecnologias buscam transpor limitações das soluções historicamente utilizadas e, por isso, serão discutidas.

Buscando garantir a convergência em baixo tempo computacional e eliminar a necessidade de inserção de dados pelos usuários, [Zhang et al. \(2016\)](#) propôs uma nova abordagem para o problema de otimização. Nela, é desenvolvido um modelo analítico para o diagnóstico de SEP através de uma função objetivo customizada ([ZHANG et al., 2016](#)). Essa função é composta de três índices associados a valores mínimos de grandezas do sistema ([ZHANG et al., 2016](#)), que garantem a convergência rápida para o problema de otimização, e utiliza apenas entradas provenientes do supervisor (estados de chaves, informações de alarmes), eliminando a inserção manual de dados ([ZHANG et al., 2016](#)).

Principalmente por garantir robustez, confiabilidade e alta tolerância a dados incompletos, a solução de [Zhang et al. \(2016\)](#) representou um marco para soluções que utilizam otimização. Contudo, não é a única abordagem a resolver problemas de seus predecessores, como também é o caso de [Novelo et al. \(2016\)](#) com novas implementações utilizando redes neurais artificiais. Nessa técnica, em vez de serem determinadas redes neurais completas para todo o SEP, são definidas redes modulares, que diagnosticam cada elemento separadamente, e uma rede final, que combina as análises desses módulos menores ([NOVELO et al., 2016](#)). Assim, garante-se uma solução desacoplada da topologia do circuito que depende apenas dos equipamentos do sistema, facilitando o treinamento

da rede, dificuldades não contornáveis em outros algoritmos desse tipo.

Complementarmente às abordagens que utilizam redes neurais, fazem uso da relação de impureza *Gini* para treinamento da árvore de decisão⁸ (QUINTERO-ZULUAGA et al., 2020). Com isso, conseguem avaliar o conjunto de *bits* de várias funções de proteção de um IED em seu processo de diagnóstico. Diferentemente da maioria das técnicas apresentadas até o momento, é uma das poucas que trabalha diretamente com subsistemas ou elementos do SEP (QUINTERO-ZULUAGA et al., 2020).

Evidentemente, existem outras soluções com redes neurais artificiais de criação recente, como discutido em Xu e Yue (2020). Porém, todas utilizam variações das abordagens *knowledge-based* já apresentadas, justificando seu não detalhamento nesse trabalho. Outras técnicas com múltiplas soluções publicadas recentemente envolvem o uso de redes de Petri, seja combinada com outras abordagens, como lógica *fuzzy*, ou sozinha.

Uma dessas soluções envolve a adição de restrições temporais aos processos de *Redes de Petri Fuzzy* (WU et al., 2012). Assim, busca-se combinar as capacidades de tratamento de informações ambíguas ou imprecisas de soluções com lógica *fuzzy* com a adição de raciocínios temporais na determinação do diagnóstico, melhorando a robustez, confiabilidade e capacidades do algoritmo (WU et al., 2012). Além disso, a técnica ainda é desenvolvida de forma modular e simplificada, o que garante que mudanças de topologia da rede elétrica sejam tratadas apenas como modificações nesses módulos (WU et al., 2012).

Outra solução recente que utiliza apenas *Redes de Petri* é apresentada em Sreerama e Swarup (2017). Nesse trabalho são exploradas as propriedades de grafo dessa tecnologia, que habilitam o uso de triangulação com os dados do sensor para determinação dos pontos de circuito em falha (SREERAMA; SWARUP, 2017). Para tanto, a grande disponibilidade de sensores na rede é explorada, condição garantida por tratar de redes inteligentes (*Smart Grids*) em nível de distribuição (SREERAMA; SWARUP, 2017), configurando uma grande desvantagem para aplicação dessa abordagem em outros contextos.

Embora todos os métodos apresentados até agora tratem o sistema de potência como entidade única, é possível estendê-los para diagnóstico de subsistemas ou componentes do SEP com pouco esforço, como para os sistemas de proteção. Contudo, esse tipo de avaliação ainda é pouco representado na literatura, com maior volume de publicações apenas nas últimas duas décadas. Esses trabalhos, por sua vez, utilizam fundamentalmente duas tecnologias, a *model-based* com *consistência* ou os sistemas especialistas.

Na realidade, essas técnicas *model-based* pouco se alteraram ao longo do tempo, seguindo sempre etapas e procedimentos semelhantes. Nelas, o dispositivo a ser diagnosticado é modelado e simulado com o evento de interesse, sendo os resultados desse processo

⁸ Em inteligência artificial, é o modelo de classificação estruturado em árvore que se destaca por ser de fácil entendimento e muito utilizada em situações de treinamento discriminatório (JOHANNES, 2010).

utilizados como referência de comparação com os sinais reais do equipamento (GOODY et al., 1997). Esse procedimento é semelhante ao utilizado em Lopes et al. (2015) para avaliação das operações de proteção em linhas de transmissão, incluído no sistema de nome *DAPPE* (*Disturbance Analysis and Protection Performance Evaluation*).

Nesse sistema, modelos de proteção de distância são construídos para elementos arco e quadrilaterais (LOPES et al., 2015), aos quais, via simulação, aplicam-se os registros analógicos (corrente e tensão) do evento de interesse. Os resultados desse processo são, então, referências para comparação com os valores de campo, concluindo o processo de diagnóstico (LOPES et al., 2015).

Esses modelos realizam a estimação de fasor fundamental por transformada de Fourier discreta de ciclo inteiro com filtragem para eliminação de componentes contínuas (LOPES et al., 2015), conseguindo satisfatoriamente representar IEDs com algoritmos numéricos de outras naturezas. É o caso do modelo apresentado em Reis et al. (2018), que submeteu o sistema *DAPPE* a testes em um simulador de tempo real e a registros oscilográficos de eventos de uma transmissora e indicou a boa performance da solução nesses cenários. Na realidade, os resultados foram tão satisfatórios que o sistema foi estendido para avaliação também de funções de sobrecorrente direcionais (LOPES et al., 2018) e abordagem semelhante foi aplicada para as proteções em geradores (PESENTE et al., 2021).

Embora bem-sucedida, o *DAPPE* é capaz de avaliar apenas a diferença entre os instantes de *trip* e de abertura de disjuntores, reais e simulados, para determinar se a operação da proteção é correta ou incorreta (LOPES et al., 2018). Assim, exige do usuário a interpretação desses resultados para determinação da função do IED com erro, no caso de haver algum (LOPES et al., 2018). Com isso, limita-se a utilização do sistema à equipe de engenharia de proteção e para análise pós-falta, apenas. Abordagens *model-based* virtualmente idênticas a essa foram propostas em outros trabalhos, como em McArthur e Davidson (2006), diferindo apenas na modelagem da proteção.

Através da aplicação de outras técnicas, foram também propostas abordagens que não requisitavam a interpretação por parte de equipes especializadas, por fornecerem maior volume de resultados e avaliações para todas as etapas de atuação de um IED. É o caso de Luo e Kezunovic (2005), que aplicaram a tecnologia *knowledge-based* de sistemas especialistas. Nessa solução, *CLIPS* foi utilizado como sistema de inferência (KEZUNOVIC et al., 1993) juntamente com três conjuntos de regras (previsão de operação do sistema, identificação de operações inesperadas da proteção e diagnóstico de causa desses eventos (LUO; KEZUNOVIC, 2005)) utilizadas para avaliação, principalmente temporal, do sistema.

A utilização de um conjunto de regras garante que cada operação da proteção possa ser tratada individualmente, com regras específicas, sendo mais generalista que avaliações

apenas do instante de *trip* (LUO; KEZUNOVIC, 2005). Ainda assim, apresentava as mesmas limitações de outros sistemas especialistas, principalmente a dificuldade de manter e criar a base de conhecimento para seu funcionamento. Contudo, esse sistema ainda seria utilizado em aplicações de integração de informações, por exemplo, como apontado em Kezunovic e Popovic (2007).

De maneira semelhante, Alves (2015) apresentou um sistema especialista para redes de distribuição, focado exclusivamente nas proteções de sobrecorrente em circuitos radiais (ALVES, 2015). Esse desenvolvimento teve como grande diferença a consideração de restrições temporais de redes radiais, considerando a coordenação entre seccionadoras, religadores e fusíveis e a sua implementação com regras simples, utilizando apenas declarações do tipo *IF-ELSE* (ALVES, 2015) e independentes da topologia da rede, o que facilita a manutenção desse sistema e sua expansão, se necessário.

Outras abordagens também foram utilizadas no diagnóstico de componentes do sistemas de potência. Em Zhang e Kezunovic (2004), é proposta uma metodologia baseada em análise de árvore de eventos⁹ para avaliação de todos possíveis cenários de operação para cada dispositivo de proteção de um SEP. Essa árvore é construída conforme configurações do relé em avaliação, iniciando-se com a falta e se dividindo em pontos de possível falha no IED em dois ramos (operação correta ou incorreta), até que seja atingido um estado final para o equipamento (ZHANG; KEZUNOVIC, 2004).

Com as árvores montadas para todas proteções, os dispositivos podem ter sua operação avaliada. Pelas ramificações existentes na árvore, é possível determinar exatamente o caminho incorreto tomado, caso haja, possibilitando determinar onde o erro ocorreu e até sugestões possíveis para correções ao problema (ZHANG; KEZUNOVIC, 2004). Sua robustez e informações fornecidas para os operadores são grandes destaques, que facilitaram sua inclusão em soluções de tempo real, como em Kezunovic (2007).

Por mais que as técnicas de diagnóstico avancem, a constante evolução da rede elétrica trará sempre novos desafios a serem superados. Assim, apesar do grande volume de tecnologias existentes nessa área, a metodologia escolhida para esse trabalho será uma técnica *model-based* com raciocínio de *consistência*, semelhante à verificada em Lopes et al. (2018).

Essa escolha está fundamentada em suas similaridades ao problema proposto, além de uma série de vantagens. Primeiro, é uma técnica pensada para o diagnóstico das operações de proteção em linhas de transmissão, eliminando as dificuldades associadas à extensão de outras técnicas. Segundo, essa abordagem se mostrou adequada para avaliação de IEDs mesmo nas situações em que seus algoritmos diferem dos implementados, indicando

⁹ Técnica utilizada para definir possíveis sequências de acidentes associadas a um ou mais eventos iniciadores, descrevendo conexões lógicas entre potenciais estados de sucesso e falha de processo a medida que respondem a esses eventos (ČEPIN, 2011).

robustez e capacidade de generalização da tecnologia. Por fim, conta com um grande volume de recursos e publicações que facilitam sua implementação.

Outras razões para a escolha da abordagem *model-based* podem, ainda, ser definidas. Tem-se disponível um reduzido volume de dados de atuações reais de proteções em linhas de transmissão, que impossibilita técnicas *knowledge-based* que exijam treinamento, como as redes neurais e abordagens de inteligência artificial, ou que requerem capacidade de extrapolação, visto que as informações disponíveis ilustram apenas uma fração dos possíveis eventos no sistema. Também, bons modelos de relés não estão facilmente disponíveis para simulação ou não são representativos o suficiente do processo de interesse, inviabilizando que esse pequeno conjunto de dados seja expandido por técnicas computacionais, incorrendo novamente nas limitações de informações para abordagens *knowledge-based*. Ainda, é necessário que a ferramenta desenvolvida dependa o menos possível das configurações e características da rede elétrica, ou seja, deve ser a mais geral possível, condição que tipicamente só é atendida por técnicas baseadas em modelos que independem da topologia e de configuração dos circuitos no sistema. Por fim, as técnicas *model-based* têm baixo custo de implantação e manutenção, dado que não é necessário manter grande volume de dados ou retreinar o sistema para cada pequena alteração, aumentando a sobrevida da solução e viabilizando seu uso prático por agentes do SEP.

Para que fosse possível avaliar também a operação de cada uma das funções de proteção dos IEDs individualmente, a metodologia de [Lopes et al. \(2018\)](#) precisou ainda ser modificada para representação dos comportamentos dinâmicos desses dispositivos e para inclusão de métricas de semelhança que permitissem avaliações de diversos tipos e modelos de equipamentos distintos, habilitando generalizações. Nesse trabalho, é proposta a descrição das operações lógicas dos dispositivos de proteção com *Redes de Petri*, tendo em vista seu processamento concorrente de dados e simples formulação matemática, além das vantagens aliadas a sua extensão em *Redes de Petri Temporais Coloridas*, que são detalhadas no [Capítulo 4](#).

3 Modelagem da Proteção de Distância

As técnicas de diagnóstico *model-based* com raciocínios de *consistência* estão fundamentadas na capacidade de simular modelos de comportamento de dispositivos ou processos, em condições próximas às reais, e na comparação desses resultados obtidos com os de campo. Assim, as técnicas de modelagem da proteção de distância determinarão a qualidade do diagnóstico final e as limitações dos algoritmos desenvolvidos, precisando ser bem conhecidas. Por isso, todas as tecnologias utilizadas na modelagem da proteção são apresentadas nesse capítulo.

Primeiramente, discutem-se as etapas necessárias para representação dinâmica de um relé genérico, utilizando como base as abordagens de programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos. Em seguida, as etapas de tratamento das entradas analógicas do modelo são apresentadas, com destaque para o processo de filtragem de sinais.

Posteriormente, é apresentado o método dos mínimos quadrados (SACHDEV; BARIBEAU, 1979) utilizado na estimação fasorial fundamental para o relé desenvolvido. Nessa seção, também são apresentadas as relações utilizadas para o cálculo das impedâncias de falta vistas pelo equipamento de proteção que compõem parte das rotinas de determinação de *trip*. Por fim, apresenta-se o raciocínio geométrico aplicado ao diagrama de impedâncias (ZIEGLER, 2011) para determinação do comportamento final da proteção.

3.1 Modelagem de Relés para Análises Dinâmicas

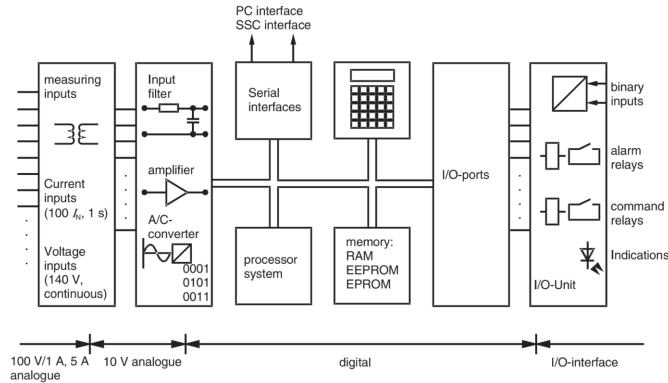
Os relés são dispositivos eletroeletrônicos de proteção do SEP capazes de alterar os circuitos de controle de redes elétricas, dadas determinadas condições em suas entradas (IEEE-SA Standards Board, 2006). Se esses relés forem completamente digitais e contarem com funcionalidades universais, associadas ou não à proteção, são chamados de *Intelligent Electronic Devices* ou IEDs (ZIEGLER, 2011).

Uma de suas funções de proteção é a chamada proteção de distância. Nela, calcula-se a impedância de falta vista pelo relé a partir das correntes e das tensões de curto-circuito medidas, comparando-as com configurações associadas à impedância da linha de transmissão protegida. Sendo o valor calculado inferior à configuração, determina-se a existência de uma falta e comandos de *trip* são enviados para os disjuntores (ZIEGLER, 2011).

Em dispositivos digitais, a maioria desses processos é implementada em rotinas numéricas, como apresentado na Figura 1 (ZIEGLER, 2011). Nela, os dois primeiros estágios estão associados ao pré-processamento das grandezas medidas e sua conversão

para valores digitais. No estágio seguinte, esses dados digitais são processados por rotinas numéricas que decidem sobre a operação da proteção, encaminhando seus resultados para as interfaces de entradas e saídas do IED, no último estágio de operação da proteção (ZIEGLER, 2011).

Figura 1 – Estrutura de IEDs e relés digitais modernos.



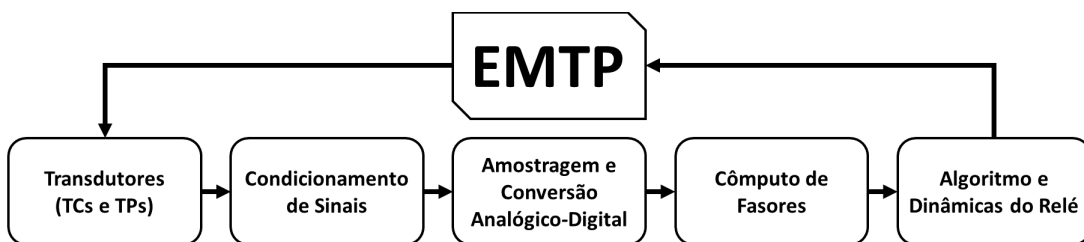
Fonte: Ziegler (2011, Figura 4.1)

Um modelo computacional para relés de distância deve, então, conseguir representar todas as etapas apresentadas na Figura 1, para os processos de interesse. Mais ainda, para a finalidade de diagnóstico, esse modelo deve permitir a simulação no domínio do tempo com dados de tensões e correntes extraídos de oscilografias.

Para a proteção de distância, esses requisitos serão atendidos apenas por modelos de simulação dinâmicos, que levem em consideração os efeitos dos estados transitório e estacionário para o equipamento (SIDHU et al., 2006).

Tipicamente, esses modelos dinâmicos são encontrados em estudos de cálculo de transitórios eletromagnéticos, com ampla literatura disponível. Neles, os processos da Figura 1 são representados por equivalente numéricos, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 2 (SIDHU et al., 2006).

Figura 2 – Blocos funcionais de um relé a ser modelado para estudo de transitórios.



Fonte: adaptada de Sidhu et al. (2006, Figura 6.2)

Nesse diagrama, são cinco as funções básicas que permitem a interação do dispositivo modelado com as correntes e tensões geradas por programas do tipo EMTP.

A primeira dessas funções, *Transdutores (TCs e TPs)*, é a etapa de conversão das altas tensões e correntes para níveis operacionais em dispositivos eletrônicos, o que é realizado por transdutores - os transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs). Nos programas EMTP esses transdutores são pré-programados para uso imediato, o que elimina a necessidade de desenvolvimento dessa função (SIDHU et al., 2006).

As duas etapas seguintes, *Condicionamento de Sinais* e *Amostragem e Conversão Analógico-Digital*, correspondem ao pré-processamento dos sinais para uso no modelo desenvolvido. Na primeira delas, submete-se a forma de onda à um filtro *anti-aliasing* para eliminar componentes de altas frequências que, em decorrência de *aliasing*¹, podem se confundir com as frequências fundamentais (SIDHU et al., 2006). Assim, esse filtro deve ser passa-baixa no domínio do tempo discreto de simulações por transformada Z ou combinação de componentes analógicos em programas EMTP (SIDHU et al., 2006).

Na segunda etapa, *Amostragem e Conversão Analógico-Digital*, é representado o processo de relés microprocessados de transformar entradas analógicas em valores digitais operáveis, através de dois estágios, amostragem e conversão analógico/digitais ou quantização (SIDHU et al., 2006). O primeiro estágio é considerado preciso, em que o sinal analógico $s(t)$ é multiplicado por um trem de pulsos discretos $s(n)$ intervalados exatamente de ΔT segundos (SIDHU et al., 2006).

O estágio de quantização, por sua vez, expressa cada amostra de $s(n)$ em um número finito de *bits*, truncando ou arredondando esses valores e gerando o chamado erro de quantização (SIDHU et al., 2006). Essa etapa pode ser evitada dependendo da precisão necessária à modelagem, podendo os resultados amostrados serem utilizados diretamente em *Cômputo de Fasores*, processo seguinte na Figura 2.

As duas funções seguintes, *Cômputo de Fasores* e *Algoritmos e Dinâmicas do Relé*, correspondem às etapas numéricas de decisão de proteção, sendo desenvolvidas conforme necessidade do modelo. No caso das funções de proteção de distância, ambas as etapas são necessárias, dado que a decisão de *trip* é baseada na impedância aparente percebida pelo IED, cujo valor é calculado a partir de fasores fundamentais de tensões e correntes (ZIEGLER, 2011).

A estimação fasorial fundamental consiste na conversão dos valores digitais em fasores equivalentes de tensão e corrente em função do tempo, podendo ser executada por múltiplos algoritmos, como a transformada discreta de Fourier ou mínimos quadrados (SIDHU et al., 2006). Uma vez executado o cálculo, esses resultados são processados pelas lógicas de proteção na última etapa do processo da Figura 2.

No último bloco do diagrama da Figura 2, *Algoritmos e Dinâmicas do Relé*, é desejado que as lógicas de proteção reproduzam da forma mais próxima possível o

¹ Em processamento de sinais, é o processo responsável por fazer com que diferentes sinais se tornem indistinguíveis um do outro quando inadequadamente amostrados (OPPENHEIM; WILLSKY, 1997).

comportamento do equipamento real em simulações EMTP. Assim, é necessário conhecer bem a lógica funcional e os tipos de IEDs que serão utilizados.

Existem fundamentalmente três categorias de relés de distância numéricos (SIDHU et al., 2006), que devem ser implementados conforme necessidade e modelo desenvolvido. Na primeira dessas categorias, os relés são construídos para emular comportamentos de equipamentos eletromecânicos ou de estado sólido de IEDs. A segunda categoria é composta por relés que computam fasores de tensão e corrente utilizados para estimar a impedância vista no IED, cujos resultados são aplicados à lógica de *trip* da proteção (SIDHU et al., 2006). No último grupo, a impedância do caminho de falta é determinada por equações diferenciais de primeira ordem, resolvidas com as tensões e correntes amostradas (SIDHU et al., 2006).

Por fim, determinam-se as saídas do modelo desenvolvido e se estabelecem suas formas de interação com a solução EMTP utilizada.

3.2 Modelagem da Função de Proteção de Distância

Os modelos de dispositivos de proteção desenvolvidos com o propósito de diagnóstico devem permitir simulações utilizando correntes e tensões genéricas, extraídas de oscilografias reais de falta, enquanto preservam o atributo de generalidade para sua aplicação a diferentes equipamentos. Em função disso, é adotada uma abordagem similar a dos modelos de relés e IEDs empregados em programas do tipo EMTP, visto que implementam todas as etapas e funcionalidades apresentadas na Figura 2 e podem ser simulados iterativamente.

No padrão COMTRADE, todos os canais analógicos de uma oscilografia são acompanhados de indicadores que especificam se as medidas disponíveis estão referidas a valores primários ou secundários dos transdutores, juntamente com os fatores de transformação para cada um dos lados (IEC, 2013). Independentemente da referência para as grandezas mensuradas, é importante destacar que esses valores gravados correspondem às entradas dos dispositivos de proteção, sendo idênticas aos sinais que estimulam relés e IEDs. Por isso, são sempre registrados na baixa tensão e/ou corrente dos transdutores, já tendo sido processados por seus TPs e TCs correspondentes, de forma que incluem, naturalmente, os erros associados a esses processos. Consideradas essas propriedades dos arquivos COMTRADE, a etapa *Transdutores (TCs e TPs)* da Figura 2 se torna desnecessária, não precisando ser implementada, por ser possível operar com valores primários ou secundários dos transdutores e converter entre eles de modo simples. Além disso, pelo ponto em que são gravadas, as formas de onda registradas já foram processadas pelos dispositivos de medição, de forma a incluírem os erros desses processos, não sendo necessário seu tratamento específico para resposta adequada do sistema. Na realidade, os valores presentes em

um arquivo COMTRADE são ideais para uso em simulações, dado que são idênticos aos utilizados pelas proteções de interesse, incluindo seus erros e imperfeições.

Também será descartável a etapa *Amostragem e Conversão Analógico-Digital*, dado que os valores registrados nos arquivos COMTRADE são idênticos aos utilizados pelo equipamento em campo, já quantizados. Sendo assim, o uso direto desses valores, sem processamentos nessa etapa, permite representar o sistema na condição mais próxima possível da realidade, que é o desejado em uma solução *model-based* com raciocínios de *consistência*. Além disso, tipicamente não é conhecido o número de *bits* utilizados para representação das grandezas numéricas nos dispositivos modelados, inviabilizando a simulação dos processos de amostragem e quantização de relés e IEDs. Como a generalidade do modelo é pré-requisito para a solução proposta, o tratamento específico desses processos especializaria em demasia os IEDs implementados, prejudicando a universalidade do sistema.

O pré-processamento do sinal em *Condicionamento de Sinais* não precisará também ser desenvolvido, dado que essa etapa é prévia à amostragem e já foi executada pelo equipamento em campo, antes da geração do arquivo COMTRADE da ocorrência. Apesar disso, as oscilografias disponíveis são tipicamente muito ruidosas e repletas de componentes de alta frequência, de forma que é necessário utilizar um filtro passa-baixa para mitigá-los. Por isso, foi implementado um filtro Butterworth de quarta ordem, conforme sugerido em [Sidhu et al. \(2006\)](#), que é abordado na [subseção 3.2.1](#).

Evidentemente, os processos de *Cômputo de Fasores e Algoritmos e Dinâmicas do Relé* deverão ser necessariamente implementados. Então, para a estimação de frequência fundamental, é utilizado o método de Mínimos Quadrados, apresentado na [subseção 3.2.2](#). Para as lógicas de operação do relé, uma abordagem geométrica baseada em ([SIDHU et al., 2006](#)) é aplicada, conforme [subseção 3.2.3.2](#).

O método de avaliação da lógica de proteção aqui apresentado não considera o comportamento dinâmico e temporal do relé, isto é, não é capaz de representar as dinâmicas e durações de tempo desses processos, indicando apenas saídas estáticas associadas aos comandos de *trip/não-trip*. A representação dessa restrição temporal é necessária para adequado tratamento das proteções de distância, de forma que foram incorporadas na solução desenvolvida através do uso de *Redes de Petri Temporais Coloridas*, cuja implementação é apresentada no [Capítulo 4](#).

3.2.1 Condicionamento de Sinais

Embora o sistema de potência brasileiro opere com frequência fundamental de 60 Hz, os IEDs amostram sinais em frequência muito superior, tipicamente da ordem de 2 kHz ou maior, fazendo com que as formas de onda registradas nos arquivos COMTRADE

tenham componentes de frequências mais elevadas (em relação à fundamental) e com maiores níveis de ruídos, especialmente para informações analógicas (OPPENHEIM; WILLSKY, 1997; SIDHU et al., 2006).

Então, é necessário condicionar as formas de onda das tensões e correntes para uso nos algoritmos dos relés, removendo componentes de frequências indesejadas nos sinais de interesse. Nesse sentido, é proposto um filtro Butterworth passa-baixa de quarta ordem para pré-processamento das medições, conforme raciocínio presente em Sidhu et al. (2006).

3.2.1.1 Filtragem

O filtro desenvolvido deve ser capaz de eliminar componentes de alta frequência das correntes e tensões medidas, sem interferir em outras propriedades desses sinais. Assim, deve ter ganho unitário em sua faixa de passagem, não modificando as frequências fundamentais da forma de onda, e o menor ganho possível na sua faixa de rejeição, garantindo a redução dos harmônicos de alta frequência. Essas características são encontradas em filtros passa-baixa (SHENOI, 2006).

Os filtros analógicos passa-baixa Butterworth são definidos por sua propriedade de resposta de magnitude plana na banda de passagem, com comportamento monotônico nela e em sua faixa de rejeição (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998). Essas são características desejadas para a filtragem necessária de tensões e correntes, justificando sua escolha para pré-processamento dos sinais de interesse.

Um filtro passa-baixa Butterworth de tempo contínuo tem a magnitude de sua resposta em frequência dada por (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998):

$$|H_n(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (j\omega/j\omega_c)^{2n}}} \quad (3.1)$$

em que j é a unidade imaginária e H_n é a função de transferência do filtro de ordem n com frequência de corte² ω_c , para os valores de frequência angular ω . Removendo a raiz quadrada de (3.1), temos:

$$|H_n(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}} \quad (3.2)$$

Por simplicidade, o filtro é normalizado com $\omega_c = 1 \text{ rad/s}$ e ω/ω_c pode ser simplificado para ω (SHENOI, 2006). Observando que o valor $j\omega$ é equivalente à frequência complexa s no domínio de Laplace (OPPENHEIM; WILLSKY, 1997) e que a magnitude ao quadrado de (3.2) pode ser decomposta em $H_n(s)H_n(-s)$, chega-se a (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998):

$$H_n(s)H_n(-s) = \frac{1}{1 + (-s)^{2n}} \quad (3.3)$$

² Frequência a partir da qual a potência de saída de um sistema, em relação à sua banda de passagem, é reduzida pela metade, tipicamente em -3 dB de ganho (OPPENHEIM; WILLSKY, 1997).

As raízes do denominador polinomial dessa função (ou os polos da função de transferência H_n ao quadrado) são os valores de s que satisfazem à equação $1 + (-1)^n s^{2n} = 0$. Desse modo, são (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998):

$$\begin{aligned} s_k &= j(-1)^{1/2n} \\ &= \exp \left[j \left(\frac{2k + n - 1}{2n} \right) \pi \right], \quad k = 0, 1, \dots, 2n - 1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Portanto, existem $2n$ polos igualmente espaçados em ângulo ao redor do círculo de raio $\omega_c = 1 \text{ rad/s}$ no plano s (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998). Para que o filtro seja causal e estável, é necessário que seus polos estejam localizados na metade esquerda do plano s (OPPENHEIM; WILLISKY, 1997), o que só é garantido para apenas alguns valores de (3.4) (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998). Eliminando os polos inadequados, o filtro normalizado de Butterworth se torna (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998):

$$H_n(s) = \frac{1}{B_n(s)}, \quad \text{com } B_n(s) = \prod_{k=1}^n (s - s_k) \quad (3.5)$$

A equação $B_n(s)$ de (3.5) produz funções polinomiais chamadas de *Polinômios de Butterworth*, cujos fatores normalizados são conhecidos e tabelados (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998). Para transformar esse filtro normalizado no desejado, basta, então, escalar a função (3.5) substituindo o valor s por s/ω_c (SHENOI, 2006) e restaurar o ganho do filtro, pelo ajuste de sua magnitude por $H_n(j0) = H_0$, de forma que (SHENOI, 2006):

$$H_n(s) = \frac{H_0}{B_n(s)} \quad (3.6)$$

que é a equação final que descreve um filtro analógico de Butterworth de ordem n .

Para o pré-processamento de tensões e correntes, foi escolhida uma frequência de corte ω_c que respeitasse o teorema de amostragem para um sinal de 60 Hz (ou seja, superior a 120 Hz) (OPPENHEIM; WILLISKY, 1997), especificada em 300 Hz. Além disso, foi escolhido um filtro de Butterworth de quarta ordem, conforme sugerido em Sidhu et al. (2006).

O *Polinômio de Butterworth* para um filtro analógico normalizado de quarta ordem é dado por (SHENOI, 2006):

$$\begin{aligned} B_4(s) &= s^4 + 2,61326 s^3 + 3,41421 s^2 + 2,61326 s + 1 \\ &= (s^2 + 0,76537 s + 1)(s^2 + 1,84776 s + 1) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Porém, todo equacionamento matemático apresentado até agora trata apenas de filtros analógicos. Para transformar as equações (3.6) e (3.7) para o domínio do tempo discreto, mais adequado para uma implementação computacional, é necessário utilizar transformação bilinear (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998).

Essa transformação algébrica realiza o mapeamento entre a variável de frequência complexa de tempo contínuo no plano s para o círculo unitário do plano z , que representa as frequências complexas em tempo discretizado (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1998). Formalmente, é definida como (OPPENHEIM; WILLSKY, 1997):

$$s = \frac{2}{\Delta T} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad (3.8)$$

com ΔT sendo o intervalo de amostragem utilizado para discretizar a grandeza de tempo contínuo. Assim, escalando a função (3.6) e aplicando a transformada bilinear, obtém-se:

$$H_4(s/\omega_c) = \frac{H_0}{B_4(s/\omega_c)}, \quad \text{com } s = \frac{2}{\Delta T} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \text{ e } \omega_c = 600\pi \quad (3.9)$$

A equação (3.9) representa o filtro digital de Butterworth de quarta ordem e frequência de corte de 300 Hz (SIDHU et al., 2006), em função do tempo de amostragem dos sinais de entrada, implementado como etapa de pré-processamento de correntes e tensões para remoção de componentes de alta frequência e ruídos.

3.2.2 Estimação de Fasor Fundamental

Uma abordagem *model-based* com raciocínios de *consistência* pressupõe que resultados esperados sejam gerados para comparação com as observações reais de operações de proteção da rede elétrica. Isso será obtido pela aplicação das tensões e correntes extraídas de oscilografias de falta dos arquivos COMTRADE ao modelo desenvolvido, alterando a impedância percebida nos IEDs modelados, modificando o comportamento da proteção.

Embora existam diversas maneiras de calcular as impedâncias de falta verificadas por um relé, foi escolhido o método dos erros mínimos quadrados, proposto por Sachdev e Baribeau (1979), para a solução. Essa abordagem explora a ideia de encontrar aproximações para sistemas sobredeterminados de equações lineares através da minimização da soma dos erros ao quadrado das funções que os descrevem (BOYD; VANDENBERGHE, 2019).

As principais vantagens dessa abordagem são sua robustez e suavidade (por ser sobredeterminado), a capacidade de responder bem a componentes contínuas no sinal de entrada (tratados no algoritmo) e seu comportamento seletivo (é pouco afetado por harmônicos que não o fundamental) (BOYD; VANDENBERGHE, 2019; SIDHU et al., 2006). Essas características justificam sua escolha para o trabalho.

3.2.2.1 Método dos Erros Mínimos Quadrados

Assume-se uma matriz A de dimensões $m \times n$ tal que o sistema linear $Ax = b$, em que b é um vetor de tamanho m , é sobredeterminado, isto é, tem mais equações m que variáveis n para sua determinação (BOYD; VANDENBERGHE, 2019). Nesse cenário, o

sistema terá solução apenas se b for combinação linear das colunas de A , de forma que é muito difícil determinar um vetor n que satisfaça $Ax = b$.

Como compromisso, procura-se, então, um valor de x tal que a equação de norma do resíduo, $r = \|Ax - b\|$, seja a menor possível (BOYD; VANDENBERGHE, 2019). Assim, escolhendo valores adequados para x , tem-se uma solução para o problema $Ax \approx b$, que se aproxima a função de interesse $Ax = b$.

Contudo, minimizar a norma do resíduo ou seu valor quadrático são equivalentes, de forma que se reescreve a expressão para minimizar a soma dos resíduos ao quadrado (BOYD; VANDENBERGHE, 2019), como:

$$r^2 = \|Ax - b\|^2 = r_1^2 + \dots + r_m^2 \quad (3.10)$$

Ao problema de determinar x que minimize (3.10) dá-se o nome de *problema de mínimos quadrados* ou *regressão*, quando aplicado ao ajuste de dados. Assumindo que as colunas da matriz A são linearmente independentes, qualquer valor de \hat{x} que minimize a função $f(x) = \|Ax - b\|^2$ deve satisfazer (BOYD; VANDENBERGHE, 2019):

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(\hat{x}) = 0, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (3.11)$$

que com o gradiente de f em \hat{x} , $\nabla f(\hat{x})$, e em forma vetorial é:

$$\nabla f(\hat{x}) = 0 \quad (3.12)$$

Em forma matricial, o gradiente de uma função qualquer f é (BOYD; VANDENBERGHE, 2019):

$$\nabla f(x) = 2A^T(Ax - b) \quad (3.13)$$

habilitando que (3.12) seja reescrita como:

$$\nabla f(\hat{x}) = 2A^T(A\hat{x} - b) = 0 \quad (3.14)$$

ou

$$A^T A \hat{x} = A^T b \quad (3.15)$$

Como foi assumido que as colunas da matriz A são linearmente independentes, $A^T A$ possui inversa (BOYD; VANDENBERGHE, 2019) e (3.15) pode ser utilizada para determinação de \hat{x} , conforme

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.16)$$

ou

$$\hat{x} = Pb, \quad \text{com } P = (A^T A)^{-1} A^T \quad (3.17)$$

cuja matriz P recebe o nome de *pseudo-inversa*. Assim, \hat{x} é dito a solução do *problema de mínimos quadrados* (BOYD; VANDENBERGHE, 2019).

3.2.2.2 Aplicação à Estimação Fasorial

Pode-se considerar qualquer sinal do sistema elétrico de potência, seja ele uma tensão ou uma corrente, descrito como uma combinação de diversos harmônicos com frequências distintas e uma componente de corrente contínua, sobretudo se a forma de onda estiver associada à saída de TPs ou TCs (SACHDEV; BARIBEAU, 1979; SIDHU et al., 2006). Assim, a forma de onda de um sinal f desse tipo pode ser matematicamente representada por

$$f(t) = k_0 e^{-t/\tau} + \sum_{m=1}^M k_m \text{sen}(m\omega_0 t + \phi_m) \quad (3.18)$$

em que τ é a constante de tempo da componente contínua, M é a maior ordem de harmônico presente no sinal, ω_0 é a frequência fundamental do sistema, k_0 e k_m são, respectivamente, as amplitudes da componente contínua e dos harmônicos e ϕ_m é o ângulo de fase da harmônica m (SACHDEV; BARIBEAU, 1979).

Em condições reais, as tensões e correntes registradas por um IED durante uma falta não contam nem com harmônicos pares nem de altas frequências, em função das etapas anteriores de filtragem dos sinais (SACHDEV; BARIBEAU, 1979). Assim, pode-se assumir que as formas de onda em (3.18) têm apenas harmônicos ímpares e os efetivamente maiores ou iguais ao de quinta ordem bloqueados pela filtragem, sem perda de generalidade, resultando em (SIDHU et al., 2006)

$$f(t) = k_0 e^{-t/\tau} + k_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + k_3 \text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3) \quad (3.19)$$

Contudo, a componente contínua $e^{-t/\tau}$ pode ser expandida por série de *Taylor*, conforme (SACHDEV; BARIBEAU, 1979)

$$e^{-t/\tau} = 1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^3 + \dots \quad (3.20)$$

Dessa expressão, consideram-se apenas os três primeiros termos. Assim a equação (3.18) pode ser reescrita como

$$f(t) = k_0 \left(1 - \frac{t}{\tau} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right) + k_1 \text{sen}(\omega_0 t + \phi_1) + k_3 \text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3) \quad (3.21)$$

que pode ter os termos $\text{sen}(\omega_0 t + \phi_1)$ e $\text{sen}(3\omega_0 t + \phi_3)$ expandidos, resultando em

$$f(t) = k_0 - \frac{k_0}{\tau} t + \frac{k_0}{2\tau^2} t^2 + k_1 \cos(\phi_1) \text{sen}(\omega_0 t) + k_1 \text{sen}(\phi_1) \cos(\omega_0 t) + k_3 \cos(\phi_3) \text{sen}(3\omega_0 t) + k_3 \text{sen}(\phi_3) \cos(3\omega_0 t) \quad (3.22)$$

A expressão (3.22) pode ser simplificada, o que resultará em (SACHDEV; BARIBEAU, 1979)

$$f(t) = \Theta_0 + \Theta_1 \text{sen}(\omega_0 t) + \Theta_2 \cos(\omega_0 t) + \Theta_3 \text{sen}(3\omega_0 t) + \Theta_4 \cos(3\omega_0 t) + \Theta_5 t + \Theta_6 t^2 \quad (3.23)$$

onde $\Theta_0 = k_0$, $\Theta_1 = k_1 \cos(\phi_1)$, $\Theta_2 = k_1 \sin(\phi_1)$, $\Theta_3 = k_3 \cos(\phi_3)$, $\Theta_4 = k_3 \sin(\phi_3)$, $\Theta_5 = -\frac{k_0}{\tau}$ e $\Theta_6 = \frac{k_0}{2\tau^2}$.

Considerando uma abordagem matricial para a equação (3.23), a equação (3.18) pode ser rescrita como (SACHDEV; BARIBEAU, 1979)

$$f(t) = a(t)\Theta \quad (3.24)$$

com

$$\begin{aligned} a(t) &= \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega_0 t) & \cos(\omega_0 t) & \sin(3\omega_0 t) & \cos(3\omega_0 t) & t & t^2 \end{bmatrix} \\ \Theta^T &= \begin{bmatrix} \Theta_0 & \Theta_1 & \Theta_2 & \Theta_3 & \Theta_4 & \Theta_5 & \Theta_6 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.25)$$

A expressão em (3.24) permite determinar o valor de f no instante de tempo t se o vetor Θ for conhecido, o que não é o caso. Resta, então, determinar uma maneira para realizar o cálculo dos parâmetros Θ , o que será feito através do método dos erros mínimos quadrados, apresentado na subseção 3.2.2.1.

Porém, o sistema formado pelas equações (3.24) e (3.25) não é sobredeterminado, tampouco é um sistema com dados discretizados como os que serão recebidos das oscilografias. Assim, é necessário discretizá-lo para a amostra k , resultando em

$$f[k\Delta T] = a[k\Delta T]\Theta \quad (3.26)$$

Resta apenas converter a expressão (3.26) em um problema sobredeterminado. Isso poderá ser feito através da utilização de amostras do intervalo de medição $k - (N - 1)$ até k , desde que $N > 7$. Ou seja, armazenado as $N - 1$ últimas medições do sinal amostrado, tem-se

$$\begin{aligned} f[k] &= \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega_0 k\Delta T) & \cos(\omega_0 k\Delta T) & \sin(3\omega_0 k\Delta T) & \cos(3\omega_0 k\Delta T) & k\Delta T & (k\Delta T)^2 \end{bmatrix} \Theta \\ f[k-1] &= \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega_0 (k-1)\Delta T) & \cos(\omega_0 (k-1)\Delta T) & \sin(3\omega_0 (k-1)\Delta T) & \cos(3\omega_0 (k-1)\Delta T) & (k-1)\Delta T & ((k-1)\Delta T)^2 \end{bmatrix} \Theta \\ &\vdots \\ f[k-(N-1)] &= \begin{bmatrix} 1 & \sin(\omega_0 (k-(N-1))\Delta T) & \cos(\omega_0 (k-(N-1))\Delta T) & \sin(3\omega_0 (k-(N-1))\Delta T) & \cos(3\omega_0 (k-(N-1))\Delta T) & (k-(N-1))\Delta T & ((k-(N-1))\Delta T)^2 \end{bmatrix} \Theta \end{aligned} \quad (3.27)$$

As equações em (3.27) podem ser rescritas em forma matricial, simplificando seu formato para

$$f = A\Theta \quad (3.28)$$

onde

$$f = \begin{bmatrix} f[k] \\ f[k-1] \\ f[k-2] \\ \vdots \\ f[k-(N-1)] \end{bmatrix}, \quad (3.29)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \text{sen}(\omega_0 k) & \text{cos}(\omega_0 k) & \text{sen}(3\omega_0 k) & \text{cos}(3\omega_0 k) & k & k^2 \\ 1 & \text{sen}(\omega_0(k-1)) & \text{cos}(\omega_0(k-1)) & \text{sen}(3\omega_0(k-1)) & \text{cos}(3\omega_0(k-1)) & k-1 & (k-1)^2 \\ 1 & \text{sen}(\omega_0(k-2)) & \text{cos}(\omega_0(k-2)) & \text{sen}(3\omega_0(k-2)) & \text{cos}(3\omega_0(k-2)) & k-2 & (k-2)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \text{sen}(\omega_0(k-(N-1))) & \text{cos}(\omega_0(k-(N-1))) & \text{sen}(3\omega_0(k-(N-1))) & \text{cos}(3\omega_0(k-(N-1))) & k-(N-1) & (k-(N-1))^2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

e

$$\Theta^T = [\Theta_0 \ \Theta_1 \ \Theta_2 \ \Theta_3 \ \Theta_4 \ \Theta_5 \ \Theta_6] \quad (3.31)$$

com os termos ΔT omitidos.

Nessa forma, as expressões em (3.28) representam um problema sobredimensionado, ao qual podem ser aplicados os raciocínios para o *problema de mínimos quadrados* para determinação dos valores de Θ . Então, os valores que melhor aproximam Θ serão dados pela expressão (SACHDEV; BARIBEAU, 1979)

$$\Theta = (A^T A)^{-1} A^T f \quad (3.32)$$

A expressão (3.32) pode ser resolvida tanto para fasores de tensão ou corrente, dado que depende apenas do instante de medição e de valores amostrados da grandeza de interesse. Cabe ressaltar que, como os termos de interesse são os referentes aos fasores fundamentais do sistema, é possível resolver apenas os termos Θ_1 e Θ_2 (SACHDEV; BARIBEAU, 1979), limitando as colunas utilizadas de A à segunda e à terceira, apenas. Essa modificação reduz a complexidade computacional e o tempo de processamento do algoritmo, trazendo benefícios às simulações.

A equação (3.32) foi implementada como forma de determinar os fasores fundamentais para o modelo de IED construído. Nele, utilizou-se um *buffer* de tamanho equivalente ao número de amostras realizadas em um ciclo de 60 Hz da rede elétrica na frequência de amostragem configurada para a proteção, capaz de armazenar os valores das últimas amostras (número de pontos por ciclo do método de mínimos quadrados equivalente à quantidade de pontos em um ciclo na frequência de amostragem do dispositivo em 60 Hz). Esses valores foram, então, utilizados para o cálculo das impedância de falta no ponto de medição, utilizado na tomada de decisão do modelo da proteção

3.2.3 Métodos Numéricos

Embora existam diferentes categorias de relés, cada uma com características próprias que exigem implementações únicas, nem todas garantem a generalidade do modelo, isto é, a capacidade de aproximar comportamentos de dispositivos mesmo que os mecanismos e técnicas numéricas apresentem variações. Esse é o caso da primeira e da terceira categoria de dispositivos de proteção de distância, visto que não é possível saber a priori quais funções estão implementadas nos algoritmos de cada um deles.

Por isso, a única categoria de relé genérica o suficiente para o propósito de diagnósticos *model-based* é a segunda. Sua generalidade vem do fato da necessidade apenas de dados externos (correntes e tensões) para simulação do dispositivo de proteção, sem necessidade de informações específicas de fabricantes como nas demais abordagens. Além disso, a lógica do relé é independente dos mecanismos de cálculo de impedância, habilitando a simulação utilizando expressões arbitrárias para a decisão de *trip*.

Então, nesse trabalho, um modelo para dispositivos de proteção de categoria dois é implementado. Nesse processo, é necessário, a partir dos fasores estimados para corrente e tensão, calcular a impedância de falta vista do ponto do relé, através da abordagem apresentada na [subseção 3.2.3.1](#). Também é essencial que as lógicas de proteção do dispositivo sejam representadas e corretamente executadas, o que fez uso de técnicas geométricas baseadas em [Sidhu et al. \(2006\)](#) e descritas na [subseção 3.2.3.2](#).

3.2.3.1 Determinação da Impedância no Caminho de Falta

Para um sistema trifásico, são dez os possíveis tipos de falta que podem acometer o circuito: faltas trifásicas, três variações de faltas fase-fase, três tipos de faltas fase-terra e três categorias de faltas fase-fase-terra. Em cada uma dessas situações, as razões entre tensões e correntes que governam o comportamento do circuito elétrico serão distintas, especialmente para a impedância de falta verificada no ponto de instalação do dispositivo de proteção.

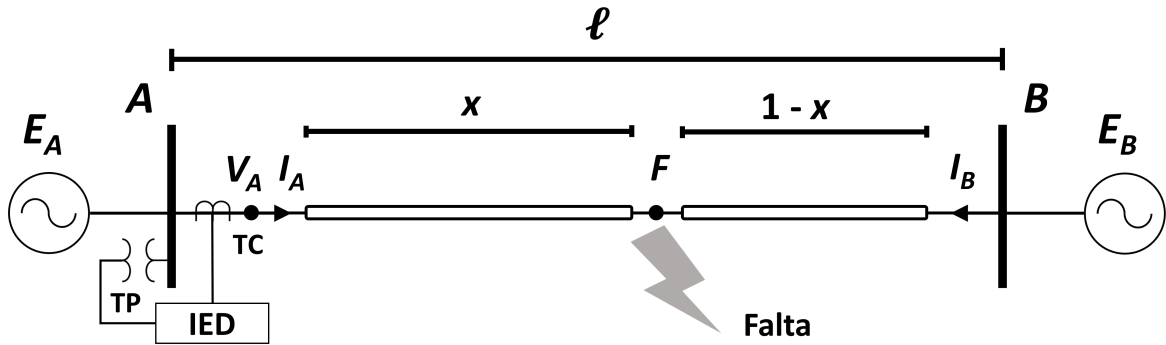
Assim, faz-se necessário o uso de diferentes relés de distância, energizados por diferentes correntes e tensões, para adequadamente determinar a ocorrência de uma falta ([HOROWITZ; PHADKE, 2014](#)). Nesse tipo de dispositivo, é imperativo que o sistema seja configurado de forma a mensurar a impedância de sequência positiva para a falta, o que possibilita que as configurações de zonas de proteção do equipamento possam ser feitas adequadamente, baseadas na impedância de sequência positiva da linha de transmissão, independente do tipo de falta ([HOROWITZ; PHADKE, 2014](#)).

Cabe, então, determinar as relações de tensões e correntes apropriadas para cada tipo de falta, para serem adequadamente utilizadas nos relés correspondentes. Para tanto, é proposto o diagrama unifilar de um circuito em falta na [Figura 3](#).

Nele, a linha de transmissão de comprimento ℓ está em falta em F , que a divide em dois segmentos com o comprimentos x % e $1 - x$ %. Esse sistema é alimentado por geradores de tensões equilibradas E_A e E_B conectados nas barras A e B , respectivamente, e são tomadas as medidas de tensão V e corrente I no ponto do conexão do IED por TCs e TPs.

Para esse circuito, aplica-se a transformação de componentes simétricas, que gera três circuitos de sequência apresentados na [Figura 4](#) ([HOROWITZ; PHADKE, 2014](#)). Para

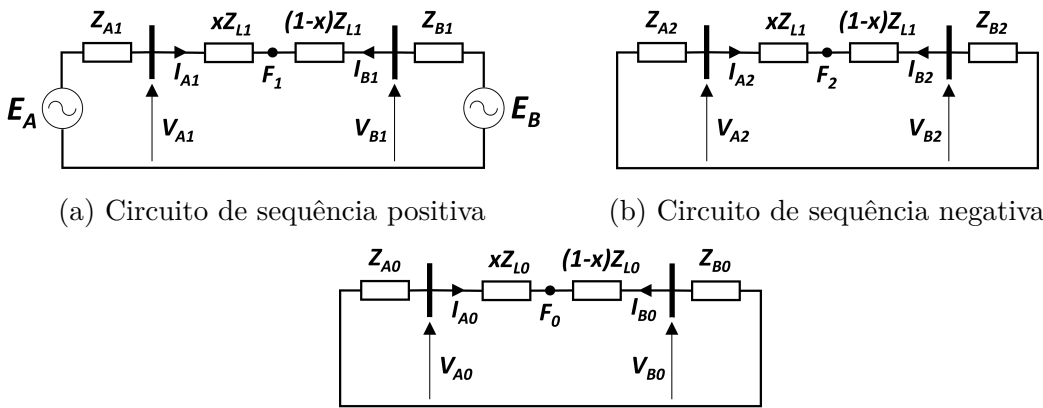
Figura 3 – Cenário de falta para determinação das grandezas de entrada da proteção de distância.



Fonte: adaptada de Horowitz e Phadke (2014, Figura 5.4)

essa situação, é assumida uma linha equilibrada, em que as impedâncias de seqüência positiva (1) e negativas (2) são iguais, mas distintas da de seqüência zero (0).

Figura 4 – Circuitos de seqüência para o sistema da Figura 3.



(a) Circuito de seqüência positiva

(b) Circuito de seqüência negativa

(c) Circuito de seqüência zero

Fonte: o autor

Os circuitos da Figura 4 serão conectados entre si de maneira distinta, conforme o tipo de falta que ocorrer na rede elétrica.

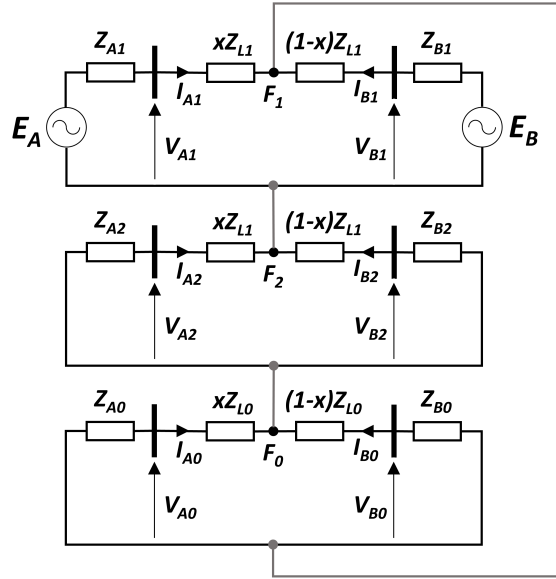
Assumindo uma falta fase-terra ocorrida na fase A, todos os circuitos de seqüência serão conectados no ponto de falta como na Figura 5 (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Sendo um evento fase-terra, a tensão no ponto de falta F é nula. Assim, nos circuitos de seqüência, tem-se (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$V_F = V_{F1} + V_{F2} + V_{F0} = 0 \quad (3.33)$$

Esse valor pode também ser descrito em função das tensões de seqüência V_{A1} , V_{A2}

Figura 5 – Cenário de falta fase-terra para determinação das grandezas de entrada da proteção de distância.



Fonte: o autor

e V_{A0} , por

$$\begin{aligned} V_{F1} &= V_{A1} - xZ_{L1}I_{A1} \\ V_{F2} &= V_{A2} - xZ_{L1}I_{A2} \\ V_{F0} &= V_{A0} - xZ_{L0}I_{A0} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Somando as várias expressões em (3.34), tem-se (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$V_{F1} + V_{F2} + V_{F0} = (V_{A1} + V_{A2} + V_{A0}) - xZ_{L1}(I_{A1} + I_{A2}) - xZ_{L0}I_{A0} \quad (3.35)$$

Porém, de (3.33), sabe-se que V_F é nulo. Também, por componentes simétricas, sabe-se que $V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A0}$, simplificando a expressão (3.35) para

$$V_A - xZ_{L1}(I_{A1} + I_{A2}) - xZ_{L0}I_{A0} = 0 \quad (3.36)$$

Manipulando-se a expressão e utilizando o fato que $I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0}$, pode-se rescrever a expressão (3.36) como (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$V_A - xZ_{L1}I_A - x(Z_{L0} - Z_{L1})I_{A0} = 0 \quad (3.37)$$

Como mais algumas manipulações em (3.37), pode-se chegar em

$$V_A = xZ_{L1} \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{A0} + I_A \right) \quad (3.38)$$

que é usada para determinar a impedância vista pelo relé para a falta, conforme (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$\begin{aligned} xZ_{L1} &= \frac{V_A}{\left(\frac{Z_{L0}-Z_{L1}}{Z_{L1}}I_{A0} + I_A\right)} \quad \text{ou} \\ xZ_{L1} &= \frac{V_A}{I_A + kI_{A0}}, \quad \text{com } k = \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}\right) \end{aligned} \quad (3.39)$$

A expressão (3.39) permite obter a impedância de falta xZ_{L1} vista pelo relé apenas baseada em valores medidos, como V_A e I_A , valores calculados a partir de medições, como I_{A0} , e por parâmetros do sistema, como as impedância de sequência Z_{L0} e Z_{L1} . Essas propriedades fazem com que a relação (3.39) seja utilizada na modelagem de dispositivos de proteção desenvolvida.

De maneira semelhante, assumindo-se faltas fase-terra nas fases B e C , é possível obter as impedâncias vistas do ponto de medição do relé como

$$\begin{aligned} xZ_{L1} &= \frac{V_B}{I_B + kI_{B0}}, \quad \text{para faltas na fase } B, \\ xZ_{L1} &= \frac{V_C}{I_C + kI_{C0}}, \quad \text{para faltas na fase } C, \\ &\text{com } k = \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}}\right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

As relações (3.39) e (3.40) foram implementadas no modelo de relé desenvolvido para faltas fase-terra. Ainda resta determinar a impedância medida pelo dispositivo de proteção para outros tipos de falta.

Assumindo então uma falta fase-fase (FF) ocorrida entre as fases B e C , os circuitos de sequência serão conectados no ponto de falta como na Figura 6a (HOROWITZ; PHADKE, 2014). Nesse caso, o circuito de sequência zero é omitido por não ter conexão com os demais (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Nessa situação, as tensões de sequência positiva e negativa no ponto de falta serão iguais, resultando em

$$\begin{aligned} V_{F1} &= V_{F2} \quad \text{ou} \\ V_{A1} - xZ_{L1}I_{A1} &= V_{A2} - xZ_{L1}I_{A2} \end{aligned} \quad (3.41)$$

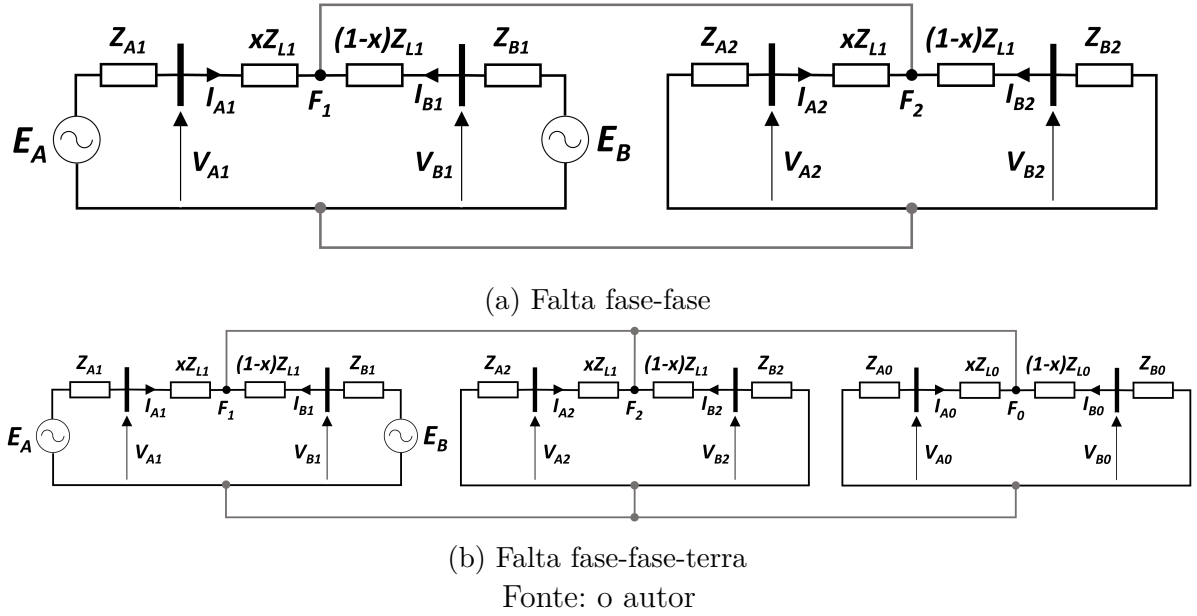
a partir da qual é possível escrever (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$xZ_{L1} = \frac{V_{F1} - V_{F2}}{I_{A1} - I_{A2}} \quad (3.42)$$

Com componentes simétricas e utilizando o fator de transformação $\alpha = 1 \angle 120^\circ$, as tensões das fases B e C são (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$\begin{aligned} V_B &= V_{F0} + \alpha^2 V_{F1} + \alpha V_{F2} \\ V_C &= V_{F0} + \alpha V_{F1} + \alpha^2 V_{F2} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Figura 6 – Cenário de falta fase-fase para determinação das grandezas de entrada da proteção de distância.



ou, equivalentemente, para tensões e correntes

$$\begin{aligned} V_B - V_C &= (\alpha^2 - \alpha)(V_{F1} - V_{F2}) \\ I_B - I_C &= (\alpha^2 - \alpha)(I_{A1} - I_{A2}) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Substituindo os valores de (3.44) em (3.42), é possível obter a expressão (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$xZ_{L1} = \frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} = \frac{V_{F1} - V_{F2}}{I_{A1} - I_{A2}} \quad (3.45)$$

É possível, então, utilizar (3.45) para determinar a impedância de falta vista pelo relé para uma falta bifásica envolvendo B e C . Repetindo esse procedimento para faltas nos pares $A-B$ e $C-A$, é possível obter expressões semelhantes, a saber (HOROWITZ; PHADKE, 2014)

$$\begin{aligned} xZ_{L1} &= \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \\ xZ_{L1} &= \frac{V_C - V_A}{I_C - I_A} \end{aligned} \quad (3.46)$$

As expressões (3.45) e (3.46) foram implementadas no modelo de relé desenvolvido para faltas bifásicas. Assim, o equipamento modelado é capaz de responder a faltas monofásicas e bifásicas (sem terra), de forma que ainda é necessário representar o comportamento para faltas bifásicas-terra e trifásicas.

Por isso, assume-se, então, um falta fase-fase-terra (FFT) ocorrida entre as fases B e C e o terra. Nessa situação, os circuitos de sequência serão conectados no ponto de falta conforme a [Figura 6b \(HOROWITZ; PHADKE, 2014\)](#).

De maneira semelhante a faltas fase-fase, a expressão (3.42) também pode ser obtida para esse caso envolvendo a terra ([HOROWITZ; PHADKE, 2014](#)). Nessa situação, contudo, as grandezas decorrentes do circuito de sequência serão distintas. Como a falta é para terra, as fases B e C terão tensão nula, o que irá resultar em tensões nulas no ponto de falta em todas as sequências. Além disso, as correntes desses circuitos em componentes simétricas serão igualmente nulas, pelo fato de o ponto de falta estar no mesmo potencial do aterramento do circuito. Assim, essas relações podem ser resumidas como

$$\begin{aligned} V_{F0} &= V_{F1} = V_{F2} \\ I_{F0} &= I_{F2} \end{aligned} \quad (3.47)$$

Desse modo, a tensão na barra A no circuito de sequência positiva será dependente apenas da impedância xZ_{L1} e da corrente I_{A1} . Como o restante do circuito está em falta para terra, é possível afirmar também que a tensão e corrente da fase A serão dadas apenas pela avaliação da sequência positiva, resultando em ([HOROWITZ; PHADKE, 2014](#))

$$V_{A1} = xZ_{L1}I_{F1} = xZ_{L1}I_A = V_A \quad (3.48)$$

Nesse cenário, tem-se também as tensões de fase dadas, a partir dos componentes de sequência, como $V_A = V_{A1}$, $V_B = \alpha^2 V_{A1}$ e $V_C = \alpha V_{A1}$. Aplicando esse valores na expressão (3.42), obtêm-se expressões semelhantes a (3.44), que podem ser simplificadas para obtenção do resultado ([HOROWITZ; PHADKE, 2014](#))

$$xZ_{L1} = \frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} \quad (3.49)$$

que é idêntica ao caso de faltas fase-fase. Esse comportamento será observado para qualquer dupla de fases envolvidas no curto-circuito para terra, cujos resultados são

$$\begin{aligned} xZ_{L1} &= \frac{V_A - V_B}{I_A - I_B} \\ xZ_{L1} &= \frac{V_C - V_A}{I_C - I_A} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Com isso, o modelo de relé desenvolvido já é capaz de avaliar faltas fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Resta apenas verificar faltas trifásicas, em que todas as fases são acometidas, para terra ou não.

Para o caso de faltas trifásicas, então, os circuitos de sequência serão totalmente desacoplados (caso envolvam terra) ou conectados em série, a partir do ponto de falta (se não envolver terra). Caso envolva a terra, como os circuitos são desacoplados e aterrados

no ponto de falta, a impedância de falta verificada pelo relé envolverá apenas a barra A e xZ_{L1} e as tensões de sequência negativa e zero serão nulas nos circuitos equivalentes. Assim, a impedância de falta será dada apenas por $xZ_{L1} = \frac{V_A}{I_A}$ (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Caso a falha não envolva a terra, raciocínio semelhante pode ser estabelecido. Porém, nessa situação, a impedância utilizada será a soma dos valores em série dos circuitos de sequência, ao invés de uma impedância individual apenas. Então, para faltas trifásicas, observamos que as equações resultam em casos específicos das situações anteriores, envolvendo outros tipos de falta, de forma que aquelas expressões são suficientes para obter esses valores de impedância (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Assim, apenas as equações (3.39), (3.40), (3.49) e (3.50) já serão suficientes para determinar as impedâncias de falta para todos os eventos de interesse. Por isso, apenas essas expressões foram implementadas no modelo de relé desenvolvido.

3.2.3.2 Lógicas de Proteção

A proteção de distância tem sua atuação determinada com base na comparação entre a impedância de falta mensurada, conforme apresentado na subseção 3.2.3.1, e as configurações programadas no dispositivo. Como não é possível determinar o valor de impedância a priori, dado que ele pode variar dentro de uma larga faixa, define-se uma zona ou região de atuação, espaço no qual qualquer valor da grandeza percebido pelo IED provoca a atuação da proteção, independentemente de seu valor específico.

Uma maneira de ilustrar essas regiões e o comportamento da função de distância frente às impedâncias de curto-circuito mensuradas em IEDs é através do uso de diagramas. Dentre as várias possibilidades desse tipo de representação, a mais adequada para descrição das características das proteções de distância é o *diagrama de impedâncias* ou *diagrama R-X* (ZIEGLER, 2011).

Nessa representação gráfica, em coordenadas cartesianas, o sistema é descrito com base em dois eixos, um horizontal e outro vertical, que representam, respectivamente, as resistências e reatâncias de curto-circuito vistas pelo dispositivo de proteção (ZIEGLER, 2011). Assim, esses diagramas apresentam graficamente todas as impedâncias relevantes para descrição e determinação completa dos comportamentos da função de distância, bem como as regiões em que os equipamentos são sensibilizados e produzem resposta à falta.

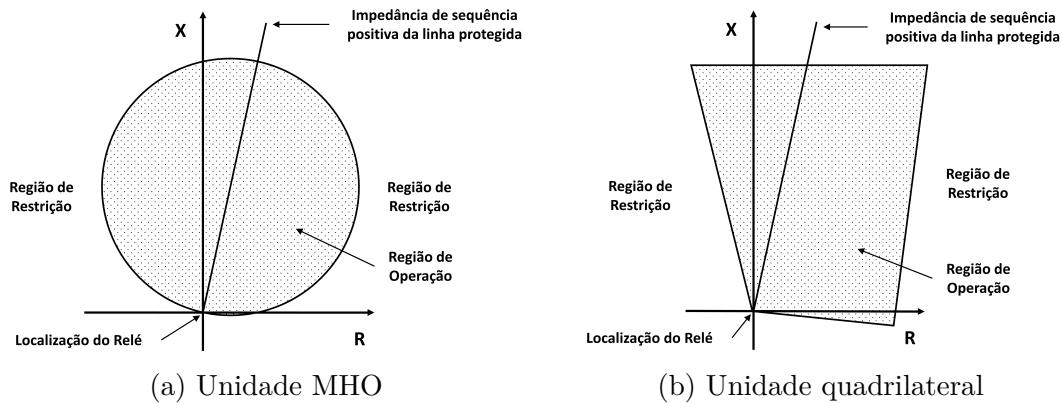
A impedância mais relevante plotada nesse diagrama é a de falta vista pelo relé. No plano $R-X$, ela é traçada como uma curva contínua cujos pontos são conectados de maneira cronológica (do início ao final do evento) e representam as resistências e reatâncias de curto-circuito, a cada instante de medição, amostragem e cálculo realizado nos dispositivos de proteção. Como curva, esses valores transitam por todo plano $R-X$,

podendo ser encontrados em diversas posições nos instantes de falta.

Nesses diagramas também são apresentadas as características da proteção de distância, por regiões fixas no espaço R - X , tipicamente em formato poligonal ou de circunferência e que representam os intervalos de atuação configurados para o IED (ZIEGLER, 2011). Em qualquer instante temporal, se a impedância de curto-circuito estiver contida no interior de qualquer figura geométrica que represente o comportamento do relé, é dito que o dispositivo de proteção foi sensibilizado e deve responder ao estímulo, através de sua atuação.

Portanto, em um relé ou IED operando em condições normais e sem defeitos, a função de distância será ativada se, e somente se, as impedâncias de curto-circuito estimadas tiverem valores contidos no interior do objeto geométrico que determina o comportamento da proteção. Esse processo é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Representação funcional de comportamentos da proteção de distância no *diagrama R-X*.



Fonte: o autor

Da intuição gráfica do funcionamento da proteção de distância, é possível propor maneiras geométricas para avaliação de sua atuação (SIDHU et al., 2006). Nessas abordagens, são obtidas equações paramétricas que representem os objetos geométricos associados à proteção configurada, os quais podem ser comparados, de forma matemática, com as impedâncias de curto-circuito para a tomada de decisão de *trip* ou *não-trip*.

Nesse sentido, apenas duas funções geométricas serão necessárias para representar as características lineares e circulares da Figura 7. O objeto geométrico que representa o comportamento de uma unidade *MHO*, como a da Figura 7a, é uma circunferência, cuja expressão para determinar se um ponto está contido nela é (SIDHU et al., 2006)

$$(R - R_C)^2 + (X - X_C)^2 \leq |Raio|^2 \tag{3.51}$$

onde R e X são, respectivamente, as partes reais e complexas da impedância de curto-circuito, (R_C, X_C) é o centro da circunferência e $Raio$ é seu raio (SIDHU et al., 2006),

todos parâmetros de configuração da proteção, à exceção de R e X . Assim, sendo (3.51) avaliada como verdadeira, diz-se que a função de distância operou, sendo o contrário indicativo de inoperação do dispositivo (SIDHU et al., 2006). Esse cenário é indicado na Figura 8a.

Para a unidade quadrilateral apresentada na Figura 7b, com objetivo de manter a generalidade dos modelos desenvolvidos, foi implementado apenas um único objeto geométrico, representativo de um semiplano, que pode ser combinado para descrever quaisquer polígonos de interesse. Nessa situação, todas as impedâncias no plano R - X em posição superior à da reta que delimita o semiplano desencadeiam o comportamento da proteção, conforme

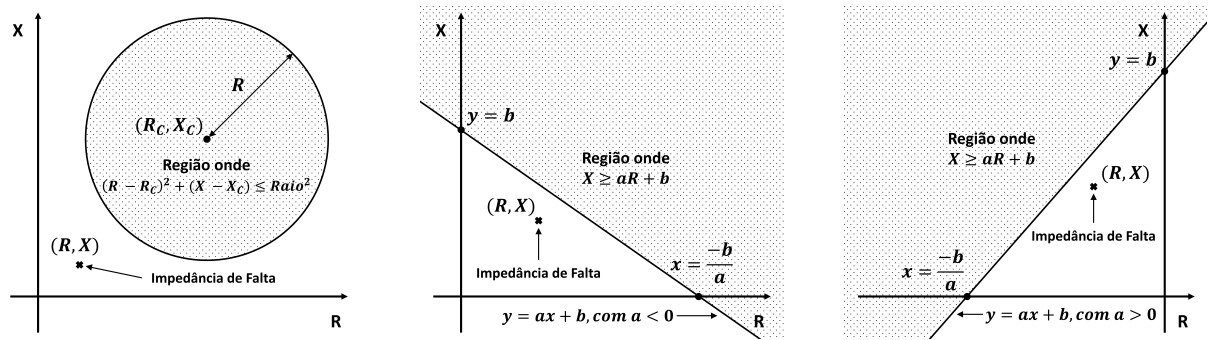
$$X \geq aR + b \tag{3.52}$$

em que (R, X) descrevem a impedância de falta do sistema e a e b são, respectivamente, a inclinação da reta e seu valor em X , ambos parâmetros de configuração da proteção. Nesse cenário, a orientação do semiplano pode ser definida conforme a inclinação a escolhida para a reta, como apresentado nas Figuras 8b e 8c.

Também é possível inverter a lógica operacional desse elemento, ou seja, avaliar outra expressão que determine a ocorrência ou não de falta, ao invés de (3.52). Essa operação oposta permite que sejam configurados semiplanos com orientação oposta à dos anteriormente apresentados, sendo possível combinar múltiplas dessas retas para descrição de polígonos, por exemplo. Para tanto, deve-se inverter a lógica descrita em (3.52) para que a determinação de falta ocorra quando a impedância estiver sob o delimitador do semiplano, conforme

$$X \leq aR + b \tag{3.53}$$

Figura 8 – Implementação de elementos de comportamentos da proteção de distância no diagrama R - X .



(a) Elemento circular

(b) Elemento Linear, $a < 0$

(c) Elemento Linear, $a > 0$

Fonte: o autor

Na realidade, todas as equações e objetos geométricos, no sistema implementado, podem ser combinados de forma livre para formar figuras diversas, incluindo polígonos, circunferências e até misturas de linhas e círculos. Nessas situações, o sistema considera a interseção entre as várias áreas de operação da geometria resultante como critério para determinação dos comandos de *trip*, ou seja, verifica se para cada objeto geométrico as operações definidas por (3.51), (3.52) e (3.53) apontam para a atuação da proteção.

Na solução desenvolvida, o *trip* é determinado apenas pela penetração da curva de impedância de falta na descrição geométrica da característica do relé (as equações são avaliadas como verdadeiras), indicando elevada sensibilidade para o sistema. Tipicamente, no entanto, os fabricantes costumam utilizar outras estratégias para determinar a ativação da proteção, que tendem a ser menos sensíveis que a aplicada, o que pode resultar em diferenças nos resultados dos equipamentos reais e simulados produzidos pela solução. Isso, contudo, não deve comprometer as capacidades de diagnóstico final dos processos de interesse.

Com todas as considerações realizadas nesse capítulo, é possível representar modelos de comportamento para as funções de proteção de distância de forma genérica o suficiente para englobar grande número de IEDs e relés utilizados por concessionárias. Contudo, todos os desenvolvimentos apresentados até esse ponto não são capazes de tratar as dinâmicas temporais e possíveis lógicas customizadas ou complexas de operação dessas proteções, o que é possível apenas através do uso de técnicas mais complexas, com as redes de Petri, apresentadas no [Capítulo 4](#).

4 Redes de Petri Temporais Coloridas

As *Redes de Petri* são ferramentas gráficas e matemáticas de modelagem aplicáveis a múltiplos processos, especialmente aqueles caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos e/ou estocásticos (MURATA, 1989). Como ferramenta gráfica, ela permite a ilustração visual das dinâmicas dos processos modelados, de forma semelhante a outras representações de grande difusão, como fluxogramas e diagramas de blocos. Como recurso matemático, descreve o sistema por relações matriciais, equações de estado ou algébricas, fornecendo notação matemática sólida para sua manipulação e operação (MURATA, 1989).

Os primeiros registros de uso desse tipo de ferramenta para esquemas de proteção em linhas de transmissão datam do início da década de 1990, como em Jenkins e Khincha (1992) e Sa e Damasio (1992), apesar de sua aplicação em sistemas elétricos de potência remontar a período anterior. Contudo, raramente é utilizada sozinha, encontrando-se a combinação dessa abordagem com conceitos temporais e estocásticos (JENKINS; KHINCHA, 1992), estendendo suas capacidades para tratamento de sistemas mais complexos e sofisticados.

Esse é o caso de modelos mais complexos das funções de distância em proteções de linhas de transmissão, em que o tempo é conceito importante para representação do comportamento dinâmico de equipamentos. Dessa forma, o uso puro de redes de Petri é inviável para esse tipo de problema, necessitando de modificações e extensões de suas funcionalidades, especialmente a inclusão de conceitos temporais. Isso é feito na forma de *Redes de Petri Temporais Coloridas* (*Coloured Timed Petri Nets* - CTPNs), que também introduzem conceitos de caracterização (tipos) dos dados manipulados.

Nesse sentido, os conceitos básicos de redes de Petri são apresentados na seção 4.1. Na seção 4.2, são apresentadas as rede de Petri temporais coloridas, bem como suas semelhanças e diferenças em relação às redes básicas. Sua aplicação na descrição de proteções de distância é tratado na seção 4.3. Por fim, na seção seção 4.4, debate-se sobre as eventuais vantagens e desvantagens da utilização das redes de Petri temporais coloridas para representação de relés e IEDs.

4.1 Redes de Petri

O conceito de *Redes de Petri* é originado na dissertação de Carl Adam Petri, apresentada em 1962 para a comunidade acadêmica de físicos e matemáticos da Universidade de Darmstadt, na Alemanha Oriental (MURATA, 1989), tendo encontrado grande sucesso de aplicação nas áreas de avaliação de performance e comunicação. Mais recentemente,

tem sido muito utilizada no tratamento de sistemas distribuídos e de eventos discretos.

Embora haja grande conjunto de aplicações para essas redes, não existem pacotes de *software* ou ferramentas específicas de grande distribuição e fácil acesso utilizadas pela academia para elas, o que resulta em implementações proprietárias para solução dos problemas em foco (MURATA, 1989). Nesse sentido, o presente trabalho também desenvolve ferramenta única para utilização em sistemas de proteção, baseada na descrição matemática das redes de Petri.

As *Redes de Petri* são um tipo particular de grafo direcional N combinado com um conjunto inicial de marcações (MURATA, 1989). Esse grafo é ponderado, direcional e bipartido, com seus nós divididos em duas categorias, chamadas de *lugares* e *transições*, que se conectam por *arcos*, interligando apenas transições a lugares ou lugares a transições (MURATA, 1989).

Os lugares são graficamente representados por círculos vazados e são associados a pré-requisitos de processos, estados do sistema ou recursos (MURATA, 1989), devido a sua capacidade de armazenar um conjunto arbitrário de informações. Esses dados são chamados de *marcações* ou *tokens*, sendo desenhados como pequenos círculos preenchidos e indicam, com sua presença, valor verdadeiro para as condições associadas ao lugar. Em contrapartida, as transições são graficamente apresentadas como retângulos preenchidos ou barras, incapazes de receber *tokens* e que correspondem a processos ou eventos do sistema modelado (MURATA, 1989). Conectando lugares e transições tem-se arcos ponderados, traçados graficamente como setas direcionais, que estão associados ao fluxo de informações no modelo, conduzindo marcações de lugares a lugares pela habilitação de transições.

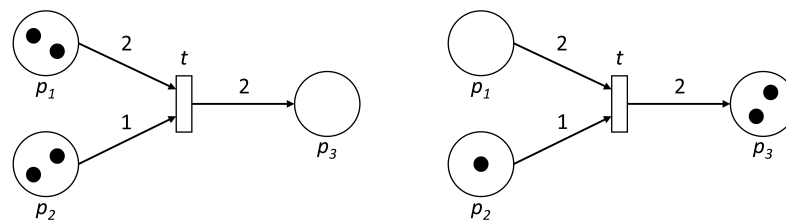
Essa estrutura representa muito bem os sistemas cujo comportamento é descrito apenas em termos de estados e suas mudanças (MURATA, 1989), permitindo simulações de suas dinâmicas por regras de disparo de transições. Para uma rede de Petri básica, esses condicionantes seriam (MURATA, 1989):

- Uma transição t é dita habilitada se cada um dos seus lugares de entrada p contiverem pelo menos $w(p, t)$ *tokens*, em que $w(p, t)$ é o peso do arco de p para t ;
- uma transição habilitada pode ou não disparar, dependendo se o processo a ela associado ocorrer ou não;
- o disparo de uma transição habilitada t remove $w(p_{entrada}, t)$ *tokens* de cada lugar de entrada $p_{entrada}$ de t e adiciona $w(t, p_{saída})$ marcações para cada lugar de saída $p_{saída}$ de t , com $w(p_{entrada}, t)$ como o peso do arco conectando $p_{entrada}$ para t e $w(t, p_{saída})$ como o peso do arco de t para $p_{saída}$.

Todo esse processo de ativação e disparo de transições é ilustrado, como exemplo, na Figura 9. Nela, é apresentada a reação química $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ de seu estágio inicial,

na Figura 9a, até seu estágio final, na Figura 9b. Os dois *tokens* em cada lugar de 9a representam duas unidades das moléculas de H_2 e O_2 , suficientes para a habilitação e disparo da transição t (MURATA, 1989). Ocorrendo a ativação de t , são consumidos *tokens* de entrada conforme o peso de cada arco, resultando na utilização de duas unidades de H_2 em p_1 e uma única de O_2 em p_2 . São produzidas, também, duas moléculas de H_2O , depositadas no lugar de saída p_3 , concluindo o disparo da transição t , que é desabilitada mesmo ainda restando recursos em p_1 . Esse cenário final é expressido pelo estado do sistema na Figura 9b.

Figura 9 – Exemplo de simulação de Rede de Petri.



(a) Condição Inicial

(b) Condição Final

Fonte: Adaptado de Murata (1989, Figura 1)

Uma transição sem nenhum lugar de entrada é chamada de transição *fonte* (ou *source*) e uma sem lugares de saída é chamada de transição *dreno* (ou *sink*). Se um par formado por um lugar p e uma transição t for tal que p é tanto a entrada como a saída de t , tem-se o chamado *self-loop*. Assim, uma rede de Petri é chamada de pura se não tiver *self-loop* e de ordinária se os pesos de todos os arcos forem unitários (MURATA, 1989).

Nesse cenário, assumem-se lugares com capacidade infinita. Essa suposição não é sempre necessária, dado que outro tipo de rede, de capacidade finita, também existe (MURATA, 1989).

Matematicamente, uma rede de Petri é definida conforme a Tabela 1 (MURATA, 1989). Dessa formalização, algumas propriedades podem ser estabelecidas para essas redes. Especificamente, dois grupos podem ser definidos, a saber, os que dependem de *tokens* iniciais e os que independem desses valores. O primeiro conjunto é denominado de *propriedades comportamentais*, enquanto o segundo é chamado de *propriedades estruturais* (MURATA, 1989).

A propriedade de *acessibilidade* é básica para estudos de propriedades dinâmicas em qualquer sistema. Nesse sentido, diz-se que uma marcação M_n é acessível a partir de um *token* M_0 se existir uma sequência de disparo de transições que transforme M_0 em M_n , sendo chamado de $R(N, M_0)$ ou $R(M_0)$ o conjunto de possibilidades de marcações alcançáveis partindo de M_0 (MURATA, 1989). Assim, um *problema de acessibilidade* está interessado em determinar $M_n \in R(M_0)$ para as marcações M_n em (N, M_0) .

Tabela 1 – Definição formal de Rede de Petri.

Uma *Rede de Petri* é uma 5-tupla, $PN = (P, T, F, W, M_0)$ onde

- $P = \{p_1, p_1, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_1, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições;
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto de arcos;
- $W : F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é uma função de pesos;
- $M_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ são as marcações iniciais;
- $P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$.

Uma rede de Petri com estrutura $PN = (P, T, F, W)$ e sem marcações iniciais é denotada por N .

Uma rede de Petri com marcações iniciais é denotada por (N, M_0) .

Adaptado de [Murata \(1989, Tabela 2\)](#)

Outra propriedades dessas redes é a *delimitação (boundedness)*. Uma rede de Petri é dita delimitada se o número de marcações em cada lugar não exceder um número finito k para qualquer marcação alcançável de M_0 , com $M(p) \leq k$ para todo lugar p e todos *tokens* $M \in R(M_0)$ ([MURATA, 1989](#)). O conceito de *vivacidade* está associado à inexistência de bloqueios no sistema modelado. Uma rede de Petri é dita viva se, independentemente das marcações alcançadas de M_0 , for possível disparar qualquer transição da rede, se continuada a sequência de disparo do sistema modelado ([MURATA, 1989](#)).

A propriedade de *reversibilidade* diz respeito à capacidade de uma rede de Petri retornar ao estado inicial dado um conjunto de disparo de transições no modelo ([MURATA, 1989](#)). Formalmente, a rede é dita reversível se, para a marcação M em $R(M_0)$, M_0 for alcançável partindo de M . Por fim, essa rede será dita *persistente* se, para quaisquer duas transições habilitadas, o disparo de uma não desabilitar a outra ([MURATA, 1989](#)).

Esse conjunto de propriedades é relevante para especificação de métodos de análise de redes de Petri. O primeiro deles diz respeito à acessibilidade, o segundo à abordagem matricial e equações de estado e, o último, a técnicas de redução e decomposição de redes ([MURATA, 1989](#)). Dado o principal objetivo da utilização de redes de Petri nesse trabalho, a simulação dinâmica de modelos, apenas a segunda abordagem é relevante e será discutida, por habilitar a representação desses grafos em equações que podem ser resolvidas para determinação do estado do sistema a partir de suas entradas, ter baixo custo computacional e implementação simples.

As operações de uma rede de Petri são descritas conforme alguns objetos mate-

máticos. O primeiro desses são as *matrizes de incidência*, que representam as conexões entre lugares e transições no sistema (MURATA, 1989). Formalmente, para uma rede de Petri N com n transições e m lugares, a matriz de incidência A é de tamanho $n \times m$ e composta de inteiros, com seus elementos dados por (MURATA, 1989)

$$A = [a_{ij}], \quad \text{com } a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (4.1)$$

onde $a_{ij}^+ = w(i, j)$ é o peso do arco da transição i para o lugar j e $a_{ij}^- = w(j, i)$ é o peso do arco da transição i partindo do lugar de j . Pelas regras de disparo de transições apresentadas, observa-se que a_{ij}^- , a_{ij}^+ e a_{ij} representam, respectivamente, o número de *tokens* removidos, adicionados ou modificados no lugar j com o disparo, uma única vez, da transição i (MURATA, 1989).

Matricialmente, a transição i será habilitada para a marcação M se, e somente se, (MURATA, 1989)

$$a_{ij}^- \leq M(j), \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

Com essa notação matricial, é possível escrever equações de estado para comportamentos do sistema. Nelas, as marcações M_k são representadas como um vetor coluna de dimensão $m \times 1$, em que a entrada j de M_k representa o número de *tokens* no lugar j imediatamente após o disparo k da sequência (MURATA, 1989). O disparo k é representado como um elemento do vetor coluna de controle u_k de dimensão $n \times 1$, com $n - 1$ zeros e o valor 1 na posição i indicando disparo da transição i em k (MURATA, 1989).

Como a linha i da matriz de incidência A denota mudança nas marcações da rede resultantes do disparo da transição j , a seguinte equação em espaço de estados para a rede de Petri pode ser escrita (MURATA, 1989)

$$M_k = M_{k-1} + A^T u_k, \quad \text{com } k = 1, 2, \dots \quad (4.3)$$

A equação (4.3) permite, então, obter o resultado M_k da execução corrente k baseado apenas nas matrizes de conexão A do sistema, no estado do modelo na iteração anterior M_{k-1} e no vetor de controle atual u_k . Assim, é possível simular o comportamento de sistemas dinâmicos definindo, para cada passo de tempo, o vetor de controle do sistema e armazenando dados das posições de marcações nos lugares, com baixo custo computacional e reduzido tempo de execução, tornando as redes de Petri ferramentas poderosas para resolver problemas com sistemas concorrentes e assíncronos.

Considerando o exemplo da Figura 9, as equações matemáticas associadas à equação química $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ são como apresentadas na Tabela 2.

Apesar de toda a simplicidade matemática e da grande gama de recursos fornecidos por redes de Petri, não é possível reproduzir comportamentos temporais e de duração com elas, condições necessárias para qualquer modelo dinâmico de processos, em especial nas

Tabela 2 – Representação matemática associada ao exemplo da Figura 9.

$$a_{ij}^+ = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad a_{ij}^- = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad A = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad M_{k-1} = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad M_k = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad u_k = \begin{matrix} t \\ [1] \end{matrix}$$

(a) Condição Inicial

$$a_{ij}^+ = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad a_{ij}^- = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad A = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ 2 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad M_{k-1} = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad M_k = \begin{matrix} t \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \quad u_k = \begin{matrix} t \\ [0] \end{matrix}$$

(b) Condição Final

proteções de distância. Assim, é necessário expandir essa abordagem através do uso de redes de Petri temporais coloridas, descritas na seção 4.2.

4.2 Redes de Petri Temporais Coloridas

As redes de Petri têm sido amplamente utilizadas para modelagem e análise de sistemas concorrentes. Muitos são os fatores que contribuem para sua difusão, destacando-se sua natureza gráfica, a capacidade de descrever processos paralelos e distribuídos de forma natural, a simplicidade dos modelos gerados e a fundamentação matemática sólida. Ainda assim, essas redes não são adequadas para a representação de uma série de processos em logística, comunicação, informação, entre outros, ou, quando os retratam, geram modelos complexos e extremamente grandes (AALST, 1993), comprometendo a performance computacional de suas implementações.

Buscando contornar essas limitações, foram propostas extensões aos modelos básicos de rede de Petri (AALST, 1993). Uma das mais relevantes ampliações adiciona o conceito de *tipos* de marcações ou *cores* às redes, que representam objetos ou recursos com propriedades específicas do sistema e que não podem ser reproduzidas por *tokens* inteiros das redes básicas (AALST, 1993). Por ampliarem o escopo das descrições possíveis e habilitarem reprodução sucinta de processos e eventos, são caracterizadas como redes de Petri de alto nível (AALST, 1993; JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

A essa extensão das redes de Petri dá-se o nome de *Rede de Petri Colorida* ou *CPN*. Nessa abordagem, os diferentes tipos de marcações determinam quais transições das múltiplas disponíveis podem ser operadas (FORTIER; MICHEL, 2003), sendo representadas graficamente por *tokens* coloridos ou pequenos círculos pretos preenchidos com especificações textuais associadas ao seu tipo (JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

Essas CPNs são tipicamente especificadas como ferramenta para modelagem de propósito geral de eventos discretos, por possibilitar a junção das redes de Petri com funcionalidades de linguagens de programação de alto nível (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Foram utilizadas com diferentes graus de sucesso na descrição de sistemas concorrentes, como os processos de comunicação, e parametrizáveis (JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

Contudo, para que essas redes coloridas possam representar sistemas complexos e de tempo real, é necessário adicionar conceitos de tempo e duração de processos a elas. Assim, para descrição desses eventos, é necessária a utilização das chamadas *Redes de Petri Temporais Coloridas (CTPNs)*, capazes de trabalhar simultaneamente com conceitos temporais e de cores (AALST, 1993).

Nas CTPNs, o conceito de tempo adotado está associado à adição de indicadores temporais (*timestamp*) às marcações da rede (AALST, 1993; JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Esses *timestamps* apontam os instantes de tempo em que determinado *token* está disponível para consumo por ativações de transições (AALST, 1993), correspondendo às janelas de tempo de duração dos processos delas.

Como extensão das redes básicas, as CTPNs preservam propriedades e definições das redes de Petri fundamentais, adicionando também características únicas que as diferenciam. Entre os comportamentos compartilhados está toda a descrição gráfica por grafos direcionais em que as transições são representadas por retângulos preenchidos ou barras, os lugares por círculos vazados e os arcos por setas direcionais conectando elementos sobre as mesmas restrições das redes de Petri básicas (JENSEN; KRISTENSEN, 2009)

Nessa extensão, os lugares representam também estados e recursos do sistema, as transições os processos e eventos da rede, e os *tokens* os recursos e condições verdadeiras para ocorrências (AALST, 1993; JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Porém, diferentemente das redes de Petri básicas, as marcações das CTPNs contam com tipos específicos determinados pelo usuário, incorrendo em mudanças em seus comportamentos. Disso, traça-se a primeira diferença: os lugares não são ocupados por *tokens* inteiros, mas sim por diferentes classes de dados (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Ainda, cada lugar tem determinado um número máximo de marcações e cores possíveis, isto é, tem limitada a quantidade e os tipos de informações neles abrigáveis em qualquer ponto no tempo (JENSEN; KRISTENSEN, 2009), habilitando novo método de controle de fluxos nas CTPNs.

Os fluxos nas CTPNs também apresentam semelhanças com os das redes básicas, removendo marcações dos lugares de entrada de transições e os adicionando aos de saídas, no caso de seu disparo (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Contudo, nessas redes de alto nível a transferência de *tokens* é controlada por expressões ou lógicas atribuídas a cada seta de fluxo e não pelo peso dos arcos (JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

Essas expressões especificam os tipos de informações que podem fluir entre lugares

e transições (ou o contrário), determinando quais recursos serão consumidos ou produzidos entre nós do grafo. Elas não precisam estar obrigatoriamente associadas à manipulação de cores que trafegam nos arcos, admitindo operações genéricas tais quais interromper processos, reiniciá-los ou redefinir todas marcações de todos lugares. Contudo, a execução dessas operações é condicionada, ocorrendo apenas se for possível associar os tipos de marcações de entrada com as classes dos *tokens* compatíveis com as saídas, após avaliação da expressão associada (JENSEN; KRISTENSEN, 2009; AALST, 1993).

Assim, os arcos também contribuem nos fluxos de um CTPN. Dessa maneira, mais dois elementos de controle de processos são adicionados às CTPNs, os arcos e os lugares, apesar das transições ainda serem as unidades principais na execução da rede. Diferentemente dos demais blocos das redes de Petri coloridas temporais, as transições apresentam comportamentos distintos de sua contraparte nas redes básicas, dada a necessidade de avaliação do tempo e das cores para determinação de sua habilitação e disparo.

A primeira diferença nas transições de CTPNs corresponde ao uso de *guardas*, operações booleanas a elas atribuídas como critério para sua execução. Caso a guarda exista, o disparo da transição é possível apenas se ela for avaliada como verdadeira, independentemente de requisitos de cores, cuja avaliação é feita em processo distinto (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Em oposição, se a guarda não existir, a transição é considerada sempre habilitada, sendo executada assim que possível. Essa expressão tipicamente indica a ocorrência do processo atrelado à transição (ZHANG et al., 2013), de modo semelhante à habilitação em redes básicas, em que só há disparo se o evento associado ocorrer.

A segunda diferença está associada ao estado da rede, aos lugares e a suas capacidades de receber marcações. Nas CTPNs, diz-se que uma transição está habilitada se for possível encontrar em seus lugares de entrada todas as cores necessárias ao processo associado e se todas suas saídas tiverem condições de receber as marcações calculadas (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Assim, diferentemente das redes de Petri básicas, a habilitação não depende apenas da quantidade de *tokens* de entrada, mas também de seus tipos e da capacidade de absorvê-los nas saídas.

A terceira e última diferença está associada às marcações temporizadas existentes, atreladas a um relógio global ou de tempo no modelo (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Como esse tempo dos *tokens* indica o instante em que determinado recurso está disponível para ser utilizado em outros processos (em relação ao relógio de tempo global), a transição só será habilitada se o tempo corrente de simulação for igual ou superior ao maior instante de tempo entre as marcações consumidas (AALST, 1993).

De modo geral, as condições de habilitação e disparo de transições podem ser resumidas em: as marcações na entrada estão em quantidade e tipo suficiente conforme expressão de arco, a guarda é avaliada verdadeira, a saída tem capacidade para receber

os tipos de *tokens* gerados e o passo de simulação é maior ou igual ao maior *timestamp* dos recursos consumidos (ZHANG et al., 2013). As transições sempre estão ansiosas para disparar, fazendo-o assim que possível, de forma que, havendo muitos processos disputando o mesmo recurso, dispara-se aquele cuja marcação temporal máxima é a menor (AALST, 1993).

Esse conjunto de características permite reproduzir sistemas muito mais complexos, pela existência de diversas ferramentas de controle de fluxo nas CTPNs, e de forma mais compacta, por ser possível melhor organizar os dados em objetos e aplicar técnicas de programação orientada a objetos. Além disso, contam com fundamentação matemática forte, habilitando a descrição dos sistemas modelados em abordagem matricial, de forma semelhante às redes básicas.

Matematicamente, as redes de Petri temporais coloridas são definidas conforme Tabela 3 (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Por representarem tipos específicos de dados, as marcações nas CTPNs também devem ter sua representação matemática alterada, segundo a Tabela 4 (JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

Consideradas as definições de CTPNs e de suas marcações, as etapas de execução de uma rede de Petri temporal colorida devem ser especificadas. Como extensão das redes básicas, que têm o comportamento matemático definido através do uso de matrizes, as operações em uma CTPN podem ser expressas de forma semelhante, considerada apenas a existência de cores e temporização às marcações e um relógio global de tempo, que deve ser adequadamente avançado (JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

De forma semelhante às redes de Petri básicas, é possível também definir *matrizes de incidência* para as CTPNs, igualmente conectando transições e lugares no sistema (MURATA, 1989). Assim, tem-se uma descrição matemática muito similar entre as redes, adicionada a complexidade decorrente dos conceitos de cores e tempo (JENSEN; KRISTENSEN, 2009). Então, para uma CTPN com n transições e m lugares, a matriz de incidência A é de tamanho $n \times m$, sendo povoada por funções de arcos, de forma que

$$A = [arcos_{tp}], \quad \text{com } arcos_{tp} = arcos_{tp}^+ - arcos_{tp}^- \quad (4.4)$$

onde $arcos_{tp}^+ = arco_{tp}(M)$ é uma função de arco conectando as transições t para os espaços de saída p e $arcos_{tp}^- = arco_{pt}(M)$ é a função associando um lugar de entrada p à transição de saída t . Nesse cenário, as funções recebem uma marcação M com um *timestamp* associado t' , no conjunto (M, t') (JENSEN; KRISTENSEN, 2009), indicativo do momento em que esses recursos podem ser consumidos pelos processos das transições. Também é importante ressaltar que as operações de $arcos_{tp}$ serão executadas apenas entre *tokens* de mesmo tipo, ou seja, a subtração de (4.4) é realizada para M de classes comuns entre $arcos_{tp}^+$ e $arcos_{tp}^-$.

Para esse contexto, a transição i será habilitada se, e somente se, as condições da Tabela 5 forem satisfeitas (JENSEN; KRISTENSEN, 2009).

Tabela 3 – Definição formal de Rede de Petri Temporais Coloridas.

Uma *Rede de Petri Temporal Colorida* é uma 9-tupla, $CTPN = (P, T, F, \Sigma, V, C, G, E, I)$ onde

- P é um conjunto finito de lugares;
- T é um conjunto finito de transições tal que $P \cap T = \emptyset$;
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto de arcos;
- Σ é um conjunto finito de cores, temporizadas ou não;
- V é um conjunto finito de variáveis tipificadas tal que $tipo(v) \in \Sigma$ para todo $v \in V$;
- $C : P \rightarrow \Sigma$ é uma função que associa um conjunto de cores a cada lugar.
- $G : T \rightarrow EXP R_v$ é uma função de guarda que associa uma guarda à transição t tal que $tipo(G(t)) \in \text{booleana}$;
- $E : F \rightarrow EXP R_v$ é uma função de expressão de arco a tal que
 - $tipo(E(a)) = C(p)_{MS}$ se p for não temporizado;
 - $tipo(E(a)) = C(p)_{TMS}$ se p for temporizado;
 com p sendo o lugar conectado ao arco a ;
- $I : P \rightarrow EXP R_\emptyset$ é uma função de inicialização ao lugar p tal que
 - $tipo(I(p)) = C(p)_{MS}$ se p for não temporizado;
 - $tipo(I(p)) = C(p)_{TMS}$ se p for temporizado;

Adaptado de [Jensen e Kristensen \(2009, Definição 11.4\)](#)

Essas condições da habilitação de transições em CTPNs podem ser agrupadas na função $habilitada_{tp}(b)$, que depende das transições, lugares e expressões que os conectam. Com esse agrupamento, de forma semelhante às redes básicas, é possível escrever equações matriciais de estado para os comportamentos do sistema. Assim, o disparo no tempo Y pode ser representado como um elemento em um vetor coluna de controle u_Y , com dimensão $n \times 1$, povoado com as expressões de habilitação do sistema, conforme ([MURATA, 1989](#))

$$u_Y = [habilitada_{tp}(b)], \quad \text{com } Y = 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

As expressões representadas em (4.5) podem assumir apenas valores do tipo *verdadeiro* e *falso*, representados como 1 e 0, respectivamente, no vetor u_Y . Assim, as variáveis de controle precisam ser resolvidas no primeiro passo da iteração de simulação, determinando as transferências de marcações que ocorrem no sistema.

Tabela 4 – Definição de Conceitos em Rede de Petri Temporais Coloridas.

A partir de uma *Rede de Petri Temporal Colorida CTPN* = $(P, T, F, \Sigma, V, C, G, E, I)$, define-se

- Uma marcação é uma função M que mapeia cada lugar de $p \in P$ em multiconjuntos de *tokens* $M(p)$ tais que
 - $M(p) \in C(p)_{MS}$ se p for não temporizado;
 - $M(p) \in C(p)_{TMS}$ se p for temporizado;
 - uma marcação temporizada é um par (M, t^*) em que M é a marcação e $t^* \in T$ é um valor no relógio global do sistema;
 - a marcação inicial temporizada é um par $(M_0, 0)$ em que M_0 é definido como $M_0(p) = I(p) \langle \rangle$ para todo $p \in P$.
-

Adaptado de [Jensen e Kristensen \(2009, Definição 11.4\)](#)

Tabela 5 – Definição de Habilitação em Rede de Petri Temporais Coloridas.

Um passo de simulação $Y \in BE_{MS}$, onde BE_{MS} é chamado de conjunto de elementos vinculantes para a transição t sobre a função b , é dito habilitado no tempo t' para a marcação (M, t^*) se, e somente se, forem satisfeitas as propriedades:

- $\forall (t, b) \in Y : G(t) \langle b \rangle$, ou seja, toda transição t vinculada a função b e pertencente a Y é tal que exista a expressão de guarda $G(t) \langle b \rangle$;
 - $\sum_{(t,b) \in Y} E(p, t) \langle b \rangle \ll = M(p)$ para todos lugares não temporizados $p \in P$, isto é, as marcações $M(p)$ nos lugares p de entrada da transição t existem em quantidade superior à necessária para a função de arco $E(p, t) \langle b \rangle$, de p para t sobre as vinculações de expressões b ;
 - $\sum_{(t,b) \in Y} (E(p, t) \langle b \rangle)_{+t'} \ll = M(p)$ para todos lugares temporizados $p \in P$, isto é, as marcações $M(p)$ nos lugares p de entrada da transição t existem em quantidade superior à necessária para a função de arco $(E(p, t) \langle b \rangle)_{+t'}$, de p para t sobre as vinculações de expressões b ;
 - $t^* \leq t'$, o relógio global t' tem um tempo superior aos das marcações t^* ;
 - t' é o menor valor de tempo para qual existe passo de simulação Y que satisfaça todas as condições anteriores.
-

Adaptado de [Jensen e Kristensen \(2009, Definição 11.6\)](#)

Como nas redes de Petri básicas, nas CTPNs a linha i relativa ao lugar p da matriz de incidência A determina as marcações decorrentes do disparo das transições t , já processadas pelas expressões dos arcos de conexões. Desse modo, também é possível estabelecer uma equação de espaço de estados para as redes de Petri temporais coloridas, conforme (MURATA, 1989)

$$M_Y = M_{Y-1} + A^T u_Y, \quad \text{com } Y = 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

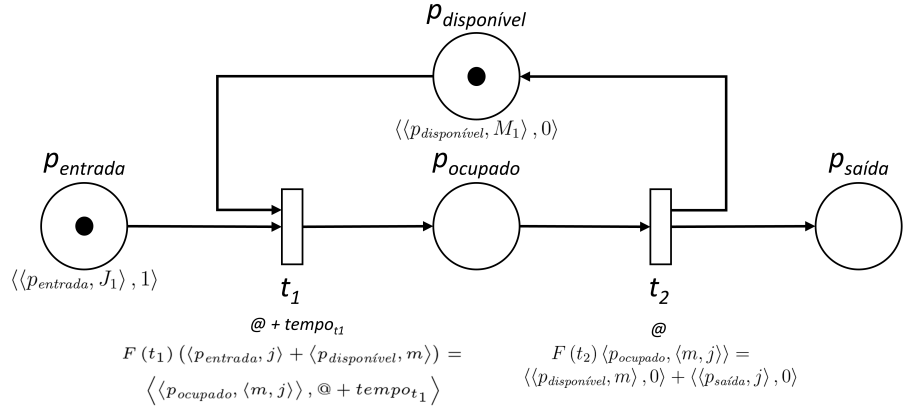
A expressão em (4.6) permite, então, determinar quais das expressões de arcos em A devem ser resolvidas para obtenção dos resultados M_Y para execução Y da simulação. Esse resultado é baseado apenas nas funções direcionais representativas do sistema e descritas em A , do estado do modelo na iteração anterior M_{Y-1} e no vetor de controle u_Y resolvido na primeira etapa da iteração.

Considera-se, então, o exemplo da Figura 10. Nele é representada uma oficina de reparos, que recebe trabalhos no lugar de entrada $p_{entrada}$, que são executados e deixam o sistema por $p_{saída}$. Nessa oficina existem diversas máquinas, representadas por marcações descritas como um conjunto de cores $M = \{M_1, M_2, \dots\}$ que podem ocupar apenas os lugares $p_{disponível}$ e $p_{ocupado}$. Ela também oferece diversos tipos de serviços, retratados como *tokens* em $p_{entrada}$ ou $p_{saída}$ em um conjunto $J = \{J_1, J_2, \dots\}$ de cores. Por fim, a combinação desses conjuntos existe apenas no lugar $p_{ocupado}$, que contém o conjunto de tuplas de cores $M \times J$, indicando quais máquinas são utilizadas em cada trabalho (AALST, 1993).

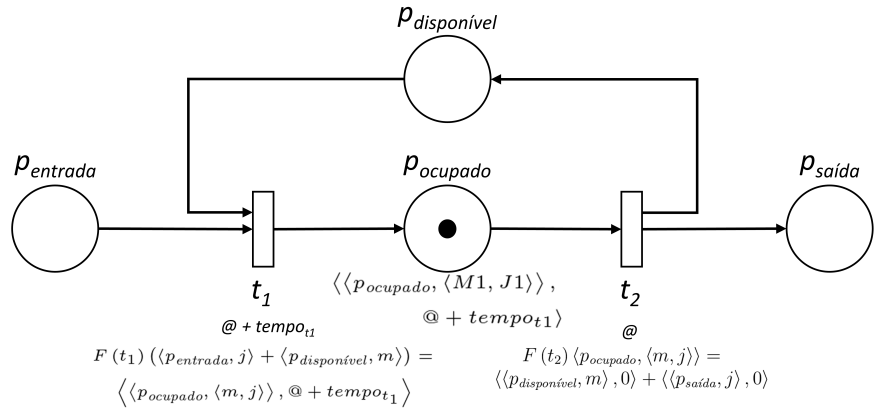
Cada uma das marcações de diversas cores existentes nesse sistema são representados como um tupla do tipo $\langle \langle lugar, valor \rangle, timestamp \rangle$, responsável por apontar o lugar em que se encontra o *token*, seu valor e o indicador temporal associado (AALST, 1993). Nessa rede, as expressões de arcos apenas transmitem marcações (de tipos adequados) das entradas para as saídas, sem nenhuma restrição para o fluxo de informações no sistema ou qualquer outra função associada, e, por isso, são omitidas da representação da Figura 10. Define-se, também, as expressões associadas à habilitação das transições t_1 e t_2 . Em ambas, são definidas expressões simples, que determinam apenas a execução dos processos associados quando da disponibilidade de marcações e os *tokens* que serão gerados em suas saídas.

A transição t_1 corresponde à execução do trabalho, sendo habilitada apenas quando os lugares $p_{entrada}$ e $p_{disponível}$ contenham marcações j e m (respectivamente) com *timestamps* inferiores ao passo corrente de simulação $@$. Assim, é necessário que $@ \geq 1$, ou seja, o instante simulado $@$ indique um tempo superior ou igual ao maior *timestamp* de todas as marcações em todas entrada. Ela também produzirá a marcação do tipo tupla $\langle \langle p_{ocupado}, \langle m, j \rangle \rangle, @ + tempo_{t_1} \rangle$ em $p_{ocupado}$, indicando que a máquina m realizará o trabalho j durante todo o tempo do processo, $tempo_{t_1}$, em relação ao relógio de tempo global, $@$, totalizando $@ + tempo_{t_1}$. Todo esse processo pode ser resumido pela expressão (AALST,

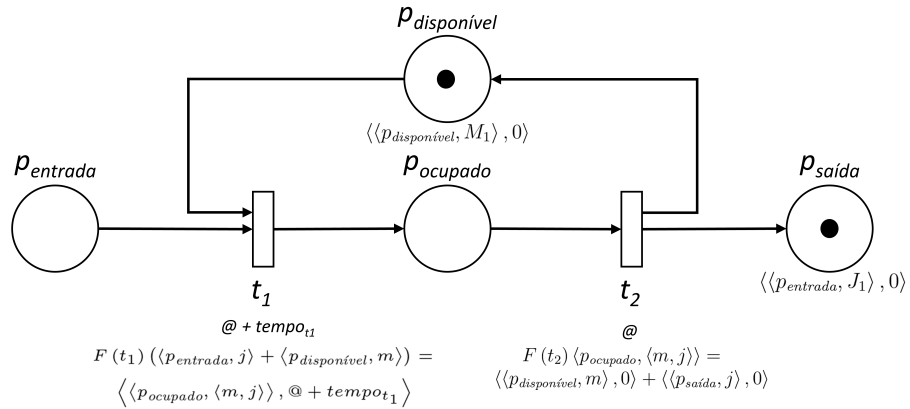
Figura 10 – Exemplo de simulação de Rede de Petri.



(a) Condição Inicial



(b) Condição Intermediária



(c) Condição Final

Fonte: Adaptado de Aalst (1993, Figura 1)

1993):

$$F(t_1) (\langle p_{entrada}, j \rangle + \langle p_{disponível}, m \rangle) = \langle\langle p_{ocupado}, \langle m, j \rangle \rangle, @ + tempo_{t_1}\rangle \quad (4.7)$$

Para a transição t_2 , indicativa da finalização do processo, a habilitação se dá com a existência de quaisquer marcações do tipo $\langle\langle p_{ocupado}, \langle m, j \rangle \rangle, @ + tempo_{t_1}\rangle$ no lugar de

entrada $p_{ocupado}$. Ela produz dois *tokens*, $\langle\langle p_{disponível}, m \rangle, 0 \rangle$ e $\langle\langle p_{saída}, j \rangle, 0 \rangle$ nos lugares de saída $p_{disponível}$ e $p_{saída}$, respectivamente, com os *timestamps* em 0, dado que t_2 não possui atraso associado, executando em qualquer passo de operação @. Esse instante de simulação @, contudo, precisa ser superior ao da marcação consumida, em $p_{ocupado}$. Matematicamente, isso é apresentado em (AALST, 1993):

$$F(t_2) \langle p_{ocupado}, \langle m, j \rangle \rangle = \langle\langle p_{disponível}, m \rangle, 0 \rangle + \langle\langle p_{saída}, j \rangle, 0 \rangle \quad (4.8)$$

Nesse exemplo, tem-se marcações iniciais nos lugares $p_{disponível}$ e $p_{entrada}$, conforme apresentado na Figura 10a. Essas marcações são suficientes para habilitar a transição t_1 , segundo a expressão (4.7), e a executar, se o passo de simulação for igual ou superior a 1. Uma vez habilitada, a transição t_1 irá produzir um *token* em $p_{ocupado}$, consumindo todos os recursos de entrada. Essa marcação é uma tupla $\langle p_{ocupado}, \langle M_1, J_1 \rangle, @ + tempo_{t_1} \rangle$ que só ficará disponível para t_2 após o tempo associado ao processo t_1 contado a partir do instante @ (AALST, 1993).

Assumindo que os instantes avaliados são superiores aos indicadores temporais nas marcações, a transição t_1 ocorrerá, resultando na situação da Figura 10b. Nesse cenário, a transição t_2 poderá ser ativada, conforme descrito pela equação (4.8). Essa ativação dependerá apenas das marcações de entrada do processo e que o passo de tempo de simulação seja superior ao valor $@ + tempo_{t_1}$, da marcação $\langle p_{ocupado}, \langle M_1, J_1 \rangle, @ + tempo_{t_1} \rangle$ em $p_{ocupado}$ (AALST, 1993). Assumindo que essa condição seja atingida, o processo de t_2 irá ocorrer, gerando marcações nos lugares $p_{disponível}$ e $p_{saída}$, conforme os tipos de dados aceitos por cada lugar. Nessa situação, o processo não incrementa o *timestamp* das marcações em andamento, dado que o tempo associado à transição é nulo, equivalente ao passo de simulação @. Essa situação é representada na Figura 10c.

Após a ativação de t_2 , o sistema não poderá habilitar nenhuma outra transição, dado que não existem *tokens* no lugar $p_{ocupado}$, pré-condição para ocorrência de t_1 . Assim, uma vez atingida a situação da Figura 10c, o sistema estará em seu estado estacionário final. Matematicamente, esse comportamento é representado conforme a Tabela 6. Nela, a expressão de arco f indica uma função simples de transferência de marcações entre lugares no sistema, ou seja, $f = 1$.

Com isso, é possível representar o comportamento dinâmico de processos complexos e com múltiplos tipos de dados, para todas as condições de controle e recursos disponíveis do sistema. Essa representação matricial permite ainda que rotinas associadas às CTPNs sejam implementadas com baixo custo computacional e tempo reduzido de execução, habilitando-as como boa ferramenta para simulação dinâmica e eficiente de sistemas complexos. Essa capacidade é necessária para representação das funções de proteção de distância em linhas de transmissão, conforme apresentado na seção 4.3.

Tabela 6 – Representação matemática associada ao exemplo da Figura 10.

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & f \\ f & 0 \\ 0 & f \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} f & 0 \\ f & 0 \\ 0 & f \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} -f & 0 \\ -f & f \\ f & -f \\ 0 & f \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad u_Y = \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \end{array}
\end{array}$$

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} t \\ \begin{bmatrix} \langle \langle p_{entrada}, J_1 \rangle, 1 \rangle \\ \langle \langle p_{disponível}, M_1 \rangle, 0 \rangle \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t \\ \begin{bmatrix} \langle \langle p_{entrada}, J_1 \rangle, 1 \rangle \\ \langle \langle p_{disponível}, M_1 \rangle, 0 \rangle \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array}
\end{array}$$

(a) Condição Inicial, no passo de simulação 1.

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & f \\ f & 0 \\ 0 & f \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} f & 0 \\ f & 0 \\ 0 & f \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} -f & 0 \\ -f & f \\ f & -f \\ 0 & f \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad u_Y = \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}
\end{array}$$

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} t \\ \begin{bmatrix} \langle \langle p_{entrada}, J_1 \rangle, 1 \rangle \\ \langle \langle p_{disponível}, M_1 \rangle, 0 \rangle \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \langle \langle p_{ocupado}, \langle m, j \rangle \rangle, @ + tempo_{t_1} \rangle \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array}
\end{array}$$

(b) Condição Intermediária, no passo de simulação $1 + tempo_{t_1}$.

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & f \\ f & 0 \\ 0 & f \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} f & 0 \\ f & 0 \\ 0 & f \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} -f & 0 \\ -f & f \\ f & -f \\ 0 & f \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad u_Y = \begin{array}{c} t_1 \quad t_2 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array}
\end{array}$$

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} t \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \langle \langle p_{ocupado}, \langle m, j \rangle \rangle, @ + tempo_{t_1} \rangle \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array} \quad \begin{array}{c} t \\ \begin{bmatrix} 0 \\ \langle \langle p_{disponível}, M_1 \rangle, 0 \rangle \\ 0 \\ \langle \langle p_{entrada}, J_1 \rangle, 0 \rangle \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} p_{entrada} \\ p_{disponível} \\ p_{ocupado} \\ p_{saída} \end{array}
\end{array}$$

(c) Condição Final, no passo de simulação maior a $1 + tempo_{t_1}$.

4.3 Modelagem de IEDs Utilizando CTPN

Os primeiros usos de redes de Petri como ferramenta para análise de esquemas de proteções em linhas de transmissão datam da década de 1990 (JENKINS; KHINCHA, 1992; SA; DAMASIO, 1992). Contudo, essa tecnologia foi utilizada, em grande parte, para avaliações globais e sistêmicas do SEP, ou seja, aquelas que envolvem sistemas extensos e complexos, não tratando de estudos de subconjuntos ou equipamentos específicos desses circuitos. Portanto, as técnicas disponíveis apresentavam limitações para análise completa e representação detalhada de sistemas pequenos, com poucos componentes ou de baixa complexidade sem que fossem adequadamente estendidas para incluir as particularidades dessas situações. Assim, até então, abordagens de diagnóstico completo para sistemas reduzidos, como uma linha de transmissão e suas proteções terminais, por exemplo, eram inviáveis.

É somente no final da década de 1990 que as redes de Petri começam a ser utilizadas para modelagens pontuais (e não sistêmicas) de sistema de potência, com o trabalho de Wang e Tang (1997). Esses primeiros modelos preocupavam-se em representar apenas os comportamentos lógicos de um sistema de proteção através de redes básicas, sem informações temporais (WANG; TANG, 1997).

Nessa abordagem, utilizavam-se dois conceitos fundamentais: *eventos* e *condições*. Os *eventos* correspondiam aos mecanismos de ação do sistema, responsáveis por alterar as configurações de circuitos elétricos do SEP, como a ativação de disjuntores, por exemplo. Essa caracterização é análoga à definição formal de transições em redes de Petri (WANG; TANG, 1997), compondo o primeiro ponto dessa modelagem. De modo semelhante, as *condições* correspondiam aos lugares de redes de Petri, por representarem recursos e estados da rede elétrica (WANG; TANG, 1997), correspondendo ao segundo elemento necessário para esse modelo de proteção (WANG; TANG, 1997).

Essa abordagem, contudo, representava apenas comportamentos discretos e de estado estacionário (*trip* e/ou não-*trip*) de proteções, sem reproduzir qualquer característica de ordem dinâmica desses dispositivos. Assim, para habilitar tratamentos dinâmicos e transitórios de relés e IEDs, através de redes de Petri, era necessária a inclusão de conceitos temporais (ROMEIS; BILLER; JAEGER, 2014). Essa extensão não modifica substancialmente as lógicas anteriormente propostas, nem as condições representativas de eventos, porém permite a representação de comportamentos complexos, de cunho temporal.

Sendo esse processo de modelagem suficiente para representar as características dinâmicas de interesse da função de distância de relé, ele foi base para as representações de IEDs e relés da ferramenta computacional desenvolvida. Além disso, para ampliação das capacidades de análise das redes implementadas para a proteção, foi utilizado também o conceito de marcações tipificadas ou cores, sobre a forma de redes de Petri temporais

coloridas. Nesse sentido, é necessário, então, apresentar o modelo de proteção desenvolvido para a função de distância, explicando as transições e lugares utilizados, os processos que representam e como foram tratados nessas redes.

Fundamentalmente, na ocorrência de uma falta no sistema elétrico, todas as proteções devem ser sensibilizadas pelo evento simultaneamente, gerando um sinal de operação caso as condições definidas para o dispositivo sejam atendidas. Dessa caracterização de qualquer IED e relé, pode-se definir quatro processos fundamentais que reproduzem esse comportamento, a saber: o equipamento está disponível, podendo ser sensibilizado pela falta; o curto-circuito é percebido e as avaliações da proteção são executadas; caso alguma função seja ativada, emite-se sinal de *trip* para os disjuntores associados; sendo o comando enviado, o dispositivo retorna para o estado de disponibilidade e aguarda novo evento.

Dessa descrição simples, deduzem-se ao menos três unidades essenciais a qualquer rede de Petri que represente proteções (ROMEIS; BILLER; JAEGER, 2014):

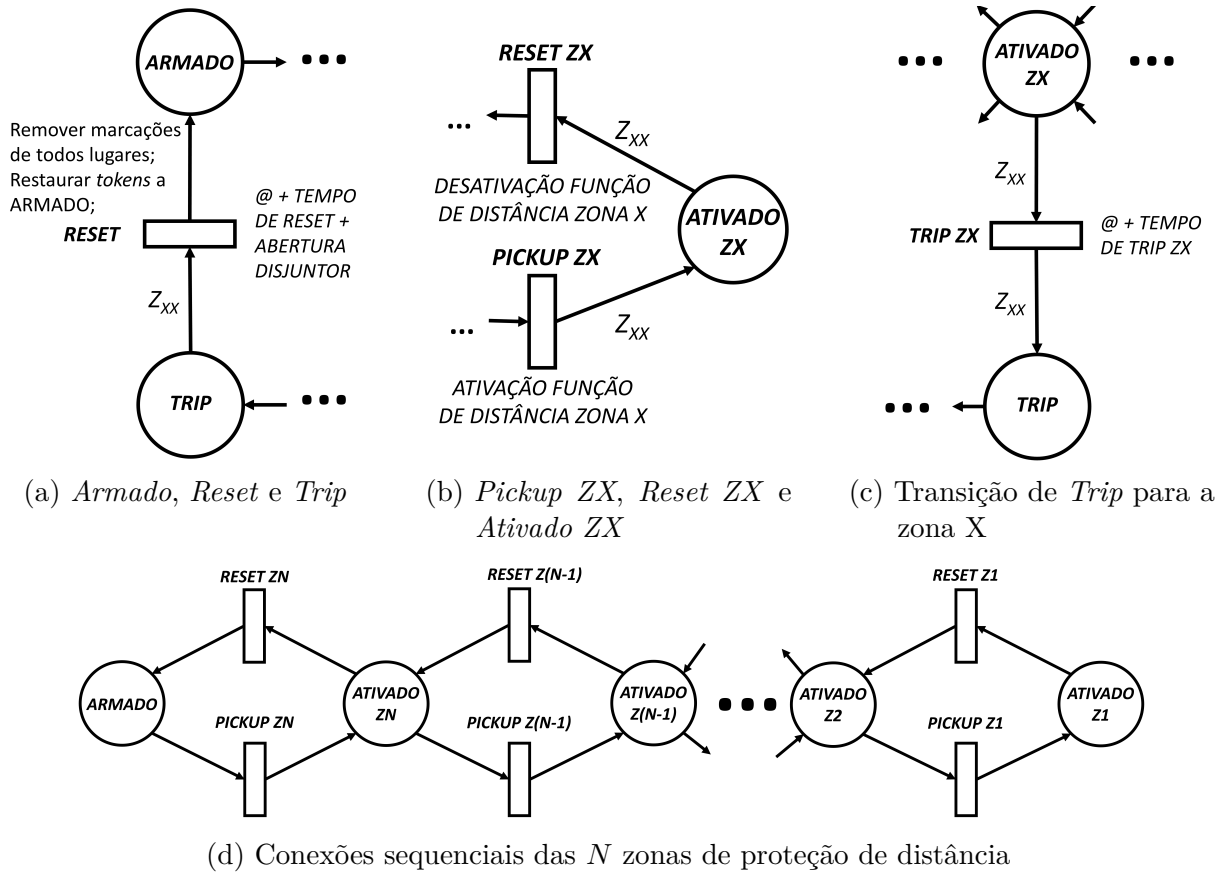
- Um lugar indicando a disponibilidade da proteção, denominado *ARMADO*;
- Um lugar indicando a emissão de comando de *trip*, chamado de *TRIP*;
- Uma transição que retorna o sistema de *TRIP* para *ARMADO*, designado como *RESET*.

A única unidade que representa ação e, portanto, precisa ser modelada, é a transição *RESET*. Sua ativação é considerada um processo de tempo morto configurável, contado a partir do instante de abertura do disjuntor associado, que é determinado por comparação da magnitude dos fasores fundamentais de corrente com o limiar de 10 % dos valores pré-falta (LOPES et al., 2018).

Esse comportamento só pode ser retratado se for possível associar intervalos temporais e controlar as condições de habilitação dos eventos representados nas transições, para que correspondam exatamente aos estados propostos para o sistema. Isso só é possível com redes de Petri temporais coloridas, através das expressões de arcos que cumprem papel de rearmar o sistema. Assim, a conexão entre *TRIP* e *ARMADO* tem programada uma função de arco que remove todas as marcações de todos lugares da CTPN e os recria no lugar inicial do processo, *ARMADO*.

Assim, define-se o primeiro bloco construtivo de uma CTPN, representado na Figura 11a. Entretanto, ainda é necessário reproduzir os comportamentos lógicos dos dispositivos de proteção. A função de distância de relés é tipicamente organizada em zonas com distintos parâmetros de proteção. Cada uma delas pode ser descrita com base em dois processos fundamentais, um atrelado ao disparo de sua lógica de proteção e outro equivalente à reinicialização do estado operativo da zona, quando as condições para operação de relés não forem mais satisfeitas (ROMEIS; BILLER; JAEGER, 2014).

Figura 11 – Conexões básicas entre transições e lugares em um modelo de proteção de distância em CTPN.



Em termos de CTPN, cada zona de proteção é descrita por, ao menos, duas transições, que equivalem à sua operação de ativação e reinicialização. O primeiro desses processos é modelado pelas técnicas numéricas de cálculo das impedâncias de curto-circuito verificadas no ponto de medição e por lógicas geométricas, conforme apresentado na [subseção 3.2.3](#). Como qualquer atuação de proteção é um problema de variáveis booleanas, isto é, cujos valores assumem apenas as condições verdadeiro ou falso (dados os dois estados existentes, ativo/inativo), é possível utilizar as expressões numéricas como as funções de guarda das transições das zonas dos relés. Com isso, define-se o primeiro processo necessário para modelagem de IEDs.

O segundo processo está associado à reinicialização da zona de proteção. Ele só pode ocorrer se for detectado que a função de ativação, antes avaliada como verdadeira para a zona, modificou seu estado para falso ou inativo. Esse comportamento determina a existência de pré-condição (sua zona estar ativa) para a ocorrência do evento, sugerindo sua representação em CTPNs através de lugares. Assim, é necessário adicionar à rede espaços associados à ativação da função de proteção adequadamente conectados às transições das zonas.

Desse modo, o primeiro e segundo processos devem se conectar a esse lugar no sentido de gerar *tokens* (da transição para o lugar) e consumi-los (do lugar para a transição), respectivamente. Por fim, é associada uma expressão de guarda ao último processo. Como oposto (contrário) à ativação da zona, utiliza-se a negação da expressão de guarda desse estímulo como função para *reset* desse segundo processo, conforme [subseção 3.2.3](#). Nessas condições, é possível, então, definir um lugar e duas transições correspondentes à ativação e desativação da zona de distância, chamados, respectivamente, de *ATIVADO ZX*, *PICKUP ZX* e *RESET ZX*, com x correspondendo ao número da zona representada, interligadas conforme [Figura 11b](#).

Apesar de já ser possível avaliar individualmente as operações das zonas de proteção, é necessário conectá-las aos demais blocos do modelo. Nesse sentido, a organização da lógica de atuação da função de distância é feita a partir da relação *zona-pickup*, isto é, as zonas internas (de menor número) só podem ser ativadas se todas as zonas externas (de maior número) a ela tiveram *pickup* anterior. Assim, é necessário conectar as zonas em modo sequencial e ordem decrescente, do maior ao menor número, e de forma que o lugar de ativação (*ATIVADO ZX*) de uma seja entrada para a seguinte, conforme [Figura 11d](#).

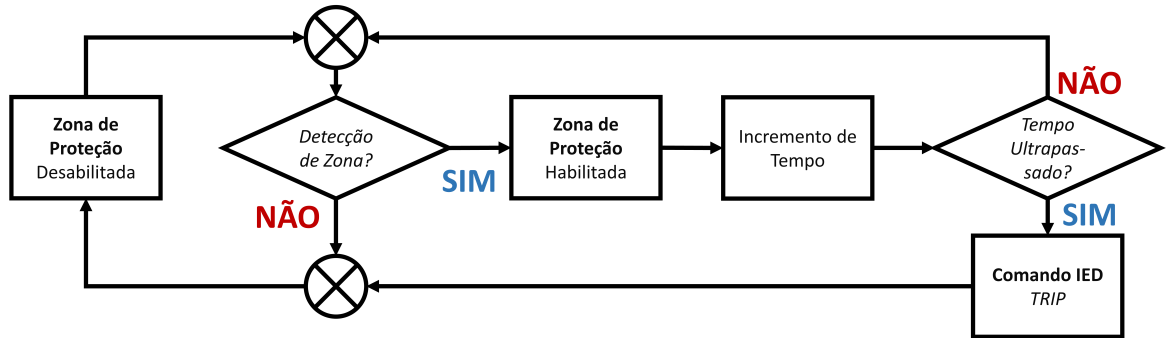
Além disso, cada uma delas pode ter um atraso de tempo atrelado, tipicamente maior quanto maior for o número da zona. Esses intervalos de tempo são computados a partir do instante de ativação da função de proteção, de forma que devem ser associados a conexões do lugar *ATIVADO ZX*. Esse é o processo final que antecede o *trip* da proteção e, como tal, é modelado pela transição *TRIP ZX* na qual se associa a duração do processo. Dessa forma, *ATIVADO ZX* deve ser interligado a *TRIP ZX* de acordo com a [Figura 11c](#).

Por fim, é necessário apenas conectar todos os blocos construtivos da [Figura 11](#) para confecção de um modelo dinâmico da função de distância em um IED. Na solução proposta, isso é realizado em tempo de execução do algoritmo, a partir de um arquivo de configuração JSON ([ECMA, European Computed Manufactures Association \(ECMA\) International](#)) com a parametrização da proteção.

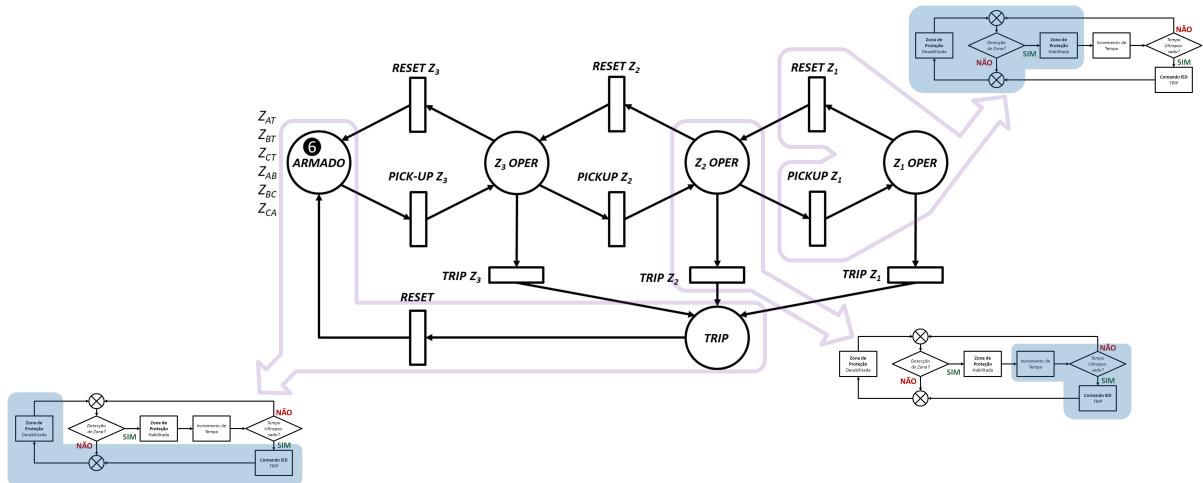
Assim, é possível associar as sequências de operações lógicas das proteções de distância aos blocos construtivos das CTPNs, de forma a representar seus comportamentos dinâmicos. Em alto nível, essa correlação entre as representações pode ser resumida na [Figura 12](#), pelo fluxograma descritivo das operações de zonas de distância do sistema e as suas correspondências em uma CTPN associada.

Nessa representação, o fluxograma da [Figura 12a](#) descreve a atuação de uma única zona de proteção de seu estado desativado (**Zona de Proteção Desabilitada**) para o ativado (**Zona de Proteção Habilitada**), no caso de haver qualquer detecção para atuação dessa zona (*Detecção de Zona?*). Uma vez que isso é constatado, o sistema inicia um contador temporal, incrementado (*Incremento de Tempo*) enquanto for mantida a ativação da zona. Esse contador é indicativo dos atrasos de tempo configurados para cada uma

Figura 12 – Correlação entre as lógicas de operação da proteção de distância e CTPNs.



(a) Fluxograma das atuações de zonas para a proteção de distância.



(b) Elementos correspondentes do fluxograma nas CTPNs.

Fonte: o autor

dessas zonas, sendo avaliado (*Tempo Ultrapassado?*) para indicar a ação de *trip* do sistema (**Comando IED TRIP**). Executando esse comando, o sistema retorna ao seu estado inicial e, caso contrário, verifica novamente se as ativações de zonas se mantêm. No caso de não se manterem, indicando falta temporária no sistema, retorna-se também para o estado de zona desabilitado e completa todo as etapas possíveis do fluxograma.

As várias partes desse fluxo podem ser associadas a blocos correspondentes na CTPN, como já foi demonstrado, sendo resumido na [Figura 12b](#) pelas regiões marcadas em roxo. Nela, as etapas de ativação e desativação das zonas (**Zona de Proteção Desabilitada** e **Zona de Proteção Habilitada**) são destacadas nos lugares *TRIP* e *ARMADO* e na transição *RESET*. Essa CTPN também representa os intervalos de tempo programados para a ativação da proteção (*Incremento de Tempo*, *Tempo Ultrapassado?* e **Comando IED TRIP**) na combinação do lugar e da transição *ZX OPER* e *TRIP ZX*, respectivamente. Por fim, é também apresentada a desativação, ativação e detecção das zonas de proteção (**Zona de Proteção Desabilitada**, **Zona de Proteção Habilitada** e *Detecção de Zona?*, respectivamente) através dos nós *RESET ZX*, *PICKUP ZX* e *ZX OPER* dessa rede e

nessa ordem.

Uma vez determinada a estrutura das CTPNs para a proteção de distância, é necessário, então, determinar as marcações e suas posições na topologia desenvolvida para descrição completa de IEDs. Para tanto, utilizaram-se seis cores distintas de *tokens*, correspondentes às impedâncias de falta (AT, BT, CT, AB, BC e CA) no ponto de medição, posicionadas inicialmente no lugar *ARMADO*. Com essa escolha, garante-se rastreabilidade de todas operações do sistema, isto é, mantêm-se registros das relações entre elemento desencadeador (impedâncias) e ação realizada (ativação de zonas), gerando insumos que permitem determinar as causas dos comportamentos observados, favorecendo a melhor parametrização desses relés.

Evidentemente, a rede de Petri da proteção apresentada corresponde a um cenário de baixa complexidade por não conter esquema de *trip* tele-assistido nem funções de bloqueio. Contudo, a adição de funcionalidades avançadas às CTPNs desenvolvidas é trivial, ficando a critério do usuário, que pode explorar a capacidade do sistema de se adaptar às configurações fornecidas a ele. Mesmo trivial, essas implementações trazem diferentes benefícios para a solução proposta, em especial a melhora de sua performance computacional e dos diagnósticos executados.

Os esquemas de *trip* assistidos são confeccionados alterando a rede original para adição de ao menos dois novos processos, um associado à transmissão de informações pelo canal de telecomunicação e outro para recebimento desses dados e a representação deles em estados na CTPN, tipicamente interligados ao lugar de *trip* do relé. O tipo de conexão, os lugares e as transições associadas dependem do esquema remoto escolhido, podendo ser transferência de disparo direto de subalcance (DUTT), transferência de disparo permissivo de subalcance (PUTT), transferência de disparo permissivo de subalcance com aceleração de zona (PUTT2) e transferência de disparo permissivo de sobrealcance (POTT). Um exemplo das modificações da rede para inclusão de um sistema de comunicação do tipo POTT2 é apresentada na [Figura 13a](#).

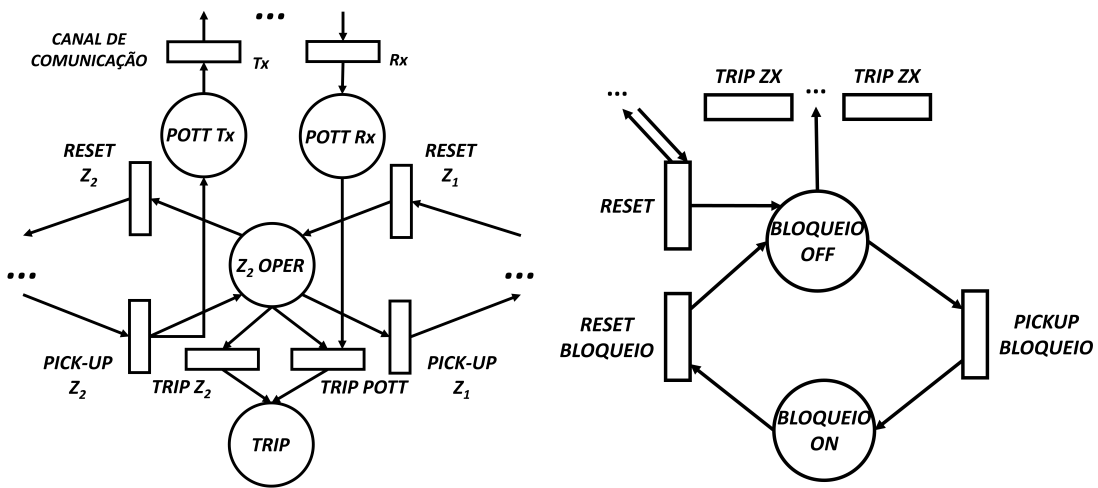
No modelo em CTPN, o canal de comunicação é descrito apenas como um atraso de tempo, tipicamente na faixa de 20 ms. Embora este valor seja estimado, a imprecisão desse retardo temporal não comprometerá a capacidade de diagnóstico da solução proposta, como será apresentado no [Capítulo 5](#).

O uso desses esquemas de proteção assistidos ainda garante benefícios computacionais para toda solução. Com a parametrização dos relés nos dois terminais da linha de transmissão e a estimativa do tempo de trânsito no canal de comunicação, é possível avaliar simultaneamente duas CTPNs em único passo de iteração. Para tanto, agregam-se as duas redes em objeto único, que pode ser resolvido por uma única matriz de incidência de modo concorrente, reduzindo o tempo de processamento necessário para diagnóstico do evento de curto-circuito. Nessas situações, é necessário realizar a sincronização prévia (anterior à

execução do algoritmo) das informações dos arquivos COMTRADE extraídos de campo, para que o sistema possa ser avaliado simultaneamente nos mesmos passos de tempo. Com isso, pode-se ainda examinar os efeitos mútuos entre as proteções nos terminais das linhas de transmissão em tempo de execução e em avaliação única, contribuindo positivamente na velocidade de solução do problema.

Os métodos de bloqueio são também de implementação trivial. Neles, é necessário conectar todas as transições de *trip* das zonas a um lugar comum *BLOQUEIO OFF*, inicializado com marcações sem cores (isto é, de cor universal, que interage com todos os tipos de dados para habilitação da transição). Tal lugar deve estar em configuração de malha, com duas transições adicionais, que descrevem os processos de habilitação (*PICKUP BLOQUEIO*) e desabilitação do bloqueio (*RESET BLOQUEIO*), e um lugar extra, indicando o impedimento a atuação das proteção, segundo apresentado na [Figura 13b](#) (ROMEIS; BILLER; JAEGER, 2014).

Figura 13 – Modificações das CTPNs para adição de funcionalidades extras em modelos de proteção de distância.



(a) Telecomunicação do tipo POTT2

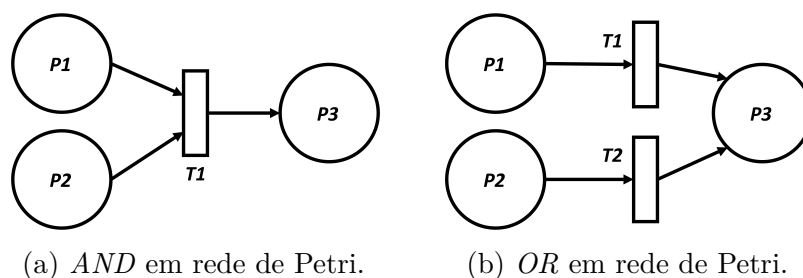
(b) Bloqueio

Fonte: o autor

Conforme diagrama, é necessário adicionar funções de guarda às transições para viabilizar o impedimento de operação da proteção. Nessa situação, as expressões booleanas devem descrever os processos de bloqueio e desbloqueio do sistema, comumente definidos em pares do tipo condição-negação da condição, respectivamente. Um exemplo de evento que poderia levar a esse comportamento seria a detecção de impedância de curto-circuito em zona reversa, cuja construção é automática na solução proposta nas situações em que o número da zona é negativo. Por fim, para que o modelo opere adequadamente em novas incidências, também é adicionada uma transição *RESET*, responsável por reinicializar a posição dos *tokens* na malha de bloqueio, acionada em conjunto com o processo de recomeço global das CTPNs.

Na realidade, essas são apenas algumas das funções adicionais disponíveis aos modelos de proteção. De forma geral, podem ser utilizadas expressões booleanas genéricas, compostas de portas *AND* ou *OR*, sobre quaisquer valores e marcações disponíveis no sistema. Essa característica explora as capacidades das redes de Petri de representação de lógicas binárias através das estruturas apresentadas na [Figura 14](#) (MURATA, 1989).

Figura 14 – Representação de operações lógicas *AND* e *OR* com redes de Petri.



Fonte: o autor

Todos os blocos construtivos apresentados são suficientes para permitir a representação dos comportamentos dinâmicos de proteções de distância, fornecendo bons modelos para aplicações de diagnóstico. Mais ainda, além das inúmeras vantagens que esse tipo de descrição de IEDs apresenta, também são produzidas algumas limitações, conforme é apresentado na [seção 4.4](#)

4.4 Vantagens e Limitações das CTPNs para Representação de IEDs

Assim como todas as técnicas de modelagem existentes, as redes de Petri temporais coloridas também apresentam vantagens e desvantagens na representação da função de distância de dispositivos de proteção. Embora muitas delas já tenham sido apresentadas ao longo do capítulo, restam ainda fatores a serem apresentados e discutidos.

As vantagens da utilização de redes de Petri temporais coloridas para descrição das proteções de distância são muitas e diversas. Primeiro, é possível executar iterações simultaneamente com a combinação de diferentes CTPNs em um único objeto, reduzindo o tempo computacional necessário para diagnóstico do sistema. Além disso, a capacidade de junção de várias redes em um único corpo de simulação, com a interação entre elas (por tele-proteções) modeladas, habilita a avaliação dos efeitos mútuos de um IED na linha de transmissão com o de outro terminal de modo concorrente, simultâneo e sem atraso de tempo, características não encontradas em outras técnicas de modelagem do sistema. A diversidade de representações possíveis com CTPNs garante também a capacidade de generalização da ferramenta de modelagem desenvolvida, isto é, sua capacidade de repre-

sentar as mais diferentes configurações possíveis, comportamento desejado em ferramenta para reprodução geral de função de distância, como na solução proposta.

A possibilidade de simulação simultânea de dois ou mais dispositivos de proteção habilita ainda a avaliação de diferentes sinais sem custo computacional adicional significativo, como os canais de comunicação, também pouco encontrada em outras soluções existentes.

Segundo, a descrição rígida necessária para caracterização das lógicas de zonas de proteção, em conjunto com a flexibilidade nas representações em CTPNs, garante a avaliação em sucessão da sequência de operações configuradas para os IEDs. Assim, tem-se capacidade de detecção intrínseca de operações fora de sequência ou com lógicas incorretas, o que não é possível, de forma natural e simples, em outras representações para dispositivos de proteção.

Terceiro, o uso de marcações de diferentes tipos e cores, juntamente com a representação de tempo e duração de processos, permite a descrição de sistemas complexos de proteção. Em especial, as CTPNs, por terem bem caracterizados os fragmentos de rede necessários à representação de expressões binárias, tornam possível a descrição de esquemas de *trip* distintos, não restritos à configuração padrão de proteção de distância, como por exemplo atuação na ativação da zona 2 apenas em distância de fase, mantendo-se inalterada a de terra. Para além dessa possibilidade, é necessário comentar que toda complexidade da lógica de operação da proteção é transferida para a topologia da CTPN, que pode ser facilmente visualizada e verificada, facilitando o entendimento situacional do comportamento programado para os IEDs, auxiliando operadores de tempo real.

Essa capacidade de transferir a complexidade lógica do esquema de *trip* para a topologia da rede gera, ainda, o quarto ponto de vantagem relevante. Como a configuração da função de distância é expressa pela forma da rede e não por expressões lógico-matemáticas pré-programadas, gera-se um desacoplamento dos métodos numéricos do sistema, que podem ser substituídos e modificados de maneira simples, sem interferir nos demais comportamentos dos IEDs (ROMEIS; BILLER; JAEGER, 2014). Assim, o sistema torna-se flexível o suficiente para permitir modelagens com diferentes estimativas favoráveis, por exemplo, garantindo flexibilidade e generalização a solução, que pode ser expandida com modificações pontuais para melhor reproduzir processos particulares de relés.

Em relação às limitações das CTPNs, têm-se primeiro aquelas associadas à sequência como são construídas as lógicas das zonas de proteção dos IEDs. Como é assumida ativação sequencial dessas zonas na confecção da rede, torna-se necessário que, para a continuidade dos processos do relé, cada um dos elementos de detecção de falta seja sensibilizado pela impedância de curto-circuito do evento. Desse modo, cria-se restrição das geometrias possíveis no plano R-X para as zonas, que devem ser configuradas de forma que todo espaço de operação das de menor número estejam contidas inteiramente nas superiores,

para garantir que suas detecções já possuam marcações nos lugares de entrada para possível *trip*. Caso contrário, embora a condição de guarda das menores zonas seja satisfeita, não há disparo da transição, pela violação do requisito de *tokens*.

Também é desvantajoso o fato de que a matriz de incidência A cresce de dimensão rapidamente com o aumento do número de elementos em simulação para descrição do sistema. Isso pode levar à depreciação rápida da performance computacional da solução em CTPNs, de forma que se torna necessária a utilização de técnicas de simplificação dos grafos associados a A . Tipicamente, esse tratamento não é trivial e acaba por comprometer a capacidade de reprodução de alguns fenômenos de interesse no modelo desenvolvido, penalidade que precisa ser ponderada para uso dessas redes nas avaliações realizadas.

É possível perceber que os benefícios do uso de CTPNs para descrição da proteção de distância de IEDs superam, em muito, as dificuldades e limitações da técnica. A isso, soma-se uma implementação computacional simples, especialmente pelas propriedades matriciais dessas redes, justificando a escolha da abordagem para resolução do problema de diagnóstico em linhas de transmissão.

5 Abordagem *model-base*

A utilização de técnicas *model-based* com raciocínios de *consistência* pressupõe a capacidade de representação computacional adequada do comportamento do sistema para os eventos de interesse. Nela, conjectura-se também a capacidade de comparação entre os resultados produzidos por modelagem e as informações extraídas de operações em campo para execução da função de diagnóstico.

Assim, são dois os pontos fundamentais necessários para implementação dessa abordagem. O primeiro deles está associado à representação do processo, que foi conduzida através do uso de redes de Petri temporais coloridas, por permitir a descrição dinâmica das funções de distância de relés e IEDs, conforme tratado no [Capítulo 4](#). O segundo ponto está vinculado à comparação dos sinais gerados por esses modelos com os extraídos do processo real, sendo necessário apresentá-lo.

São duas as técnicas aplicadas para comparação dos sinais, de níveis de complexidade distintos. A primeira e mais simples delas corresponde à comparação do valor absoluto da diferença temporal entre bordas de subida e descida de formas de onda com limiares temporais especificados pelo usuário. Esse processo é responsável por determinar se, dada a tolerância definida, dois ou mais processos podem ser considerados iguais, conforme apresentado na [seção 5.1](#).

A segunda dessas abordagens, consideravelmente mais complexa, avalia os sinais em função do cálculo da correlação cruzada entre eles. A correlação cruzada é uma operação matemática que aponta um coeficiente de similaridade entre formas de onda, determinado a partir do ponto de máxima sobreposição das partes de maior semelhança entre elas quando aplicado um deslocamento temporal a uma delas. Nessa operação, é fornecido um valor numérico normalizado que pode ser utilizado como índice comparativo de similitude de sinais, muito útil ao diagnóstico do sistema, como mostrado na [seção 5.2](#).

Nesse capítulo, exploram-se as abordagens aplicadas para determinação de semelhança entre sinais, que são discutidas em detalhes. Por fim, esses dois métodos de comparação são combinados em uma etapa final única que produz o diagnóstico global da proteção de distância, tópico discutido na [seção 5.3](#).

5.1 Diferença Temporal Entre Ativações e Desativações

A primeira abordagem utilizada para comparação de curvas no diagnóstico do sistema é baseada na diferença temporal entre os sinais reais e os simulados. Nela, a diferença absoluta entre os instantes de operação (ativação e desativação) das formas de

onda simuladas e obtidas em campo é comparada com um intervalo de tempo máximo, estabelecido pelo usuário, para determinação de igualdade considerando variações entre modelo e equipamento real.

Aos valores de tolerância para comparação, aplica-se uma função de propagação de erros responsável por estabelecer multiplicadores numéricos ligados ao grau de qualidade da modelagem desenvolvida. Com isso, processos diretamente representados nos modelos de relé desenvolvidos, como ativação de zonas de proteção, contam com multiplicadores unitários e são avaliados diretamente pelo limiar determinado pelo usuário. Caso contrário, o multiplicador é proporcional à distância, em número de processos com incertezas, entre o evento diretamente representado mais próximo e a funcionalidade analisada, gerando valores superiores a um e, por consequência, maior faixa de tolerância para variações das bordas dos sinais.

Por fim, esses valores de diferenças, caso não sejam considerados diretamente iguais pelas tolerâncias definidas e erros aplicados, são utilizados em funções de normalização que os adequam a um intervalo de zero a um, passível de comparação com outros valores, em processo mais complexo de diagnóstico.

5.1.1 Propagações de Erros

A propagação de erros incluída no sistema desenvolvido representa, primariamente, as incertezas de processos não diretamente modelados pelas funções de proteção de distância implementadas. Os erros propagados dependem de *multiplicadores de erro*, representados como números inteiros que atuam sob a tolerância definida pelo usuário para cada dispositivo de proteção. É necessário, então, determinar o valor numérico desses multiplicadores.

Matematicamente, a abordagem utilizada assume que as incertezas são arranjas de forma que o erro dos processos encadeados seja o maior possível, garantindo que as diferenças encontradas sejam sempre comparadas à maior variação aceita pelo usuário. Essa metodologia visa garantir entendimento e interpretação simplificada dos resultados das análises pelos usuários da solução. Considera-se, então, o erro médio simples no sistema, cujo valor é dado como (HUGHES; HASE, 2010)

$$\delta_{erro} = \sum_i \delta_i \quad (5.1)$$

em que δ_{erro} é o erro médio total da soma dos processos individuais e δ_i é a taxa de variação média do processo i , ou seja, seu erro individual associado.

Porém, nas operações de diagnóstico de proteção de distância do SEP, o usuário é capaz apenas de especificar uma constante de erro, associada aos processos diretamente modelados no sistema - a ativação das funções de proteção de cada zona. Por isso, é necessário determinar as incertezas de processos cuja modelagem é feita indiretamente.

Para esses processos, assume-se um erro básico igual à tolerância especificada pelo usuário, ao qual se aplica um *multiplicador de erro*. Assim, sendo esse valor configurável denominado de $\delta_{erro\ usuário}$, a equação (5.1) pode ser reescrita como

$$\delta_{erro} = n \cdot \delta_{erro\ usuário} \quad (5.2)$$

onde n é o *multiplicador de erro* cujo valor corresponde ao número de processos executados do primeiro diretamente representado ao de interesse na rede de Petri do IED modelado.

O valor de n é determinado através do algoritmo *Depth-first search* (DFS) (JUNGNICKEL, 2013) de navegação em estrutura de grafos do tipo árvore¹. Nessa abordagem, para os nós iniciais de navegação são escolhidas transições cujas funções de guarda associadas correspondam diretamente à ativação de alguma zona, conforme apresentado, por exemplo, pela área hachurada em azul na Figura 15. É determinado, então, o caminho mais curto dos nós dessas transições até o nó da variável ou processo de interesse na rede de Petri, no qual se conta o número de transições distintas percorridas e que correspondem ao valor de n .

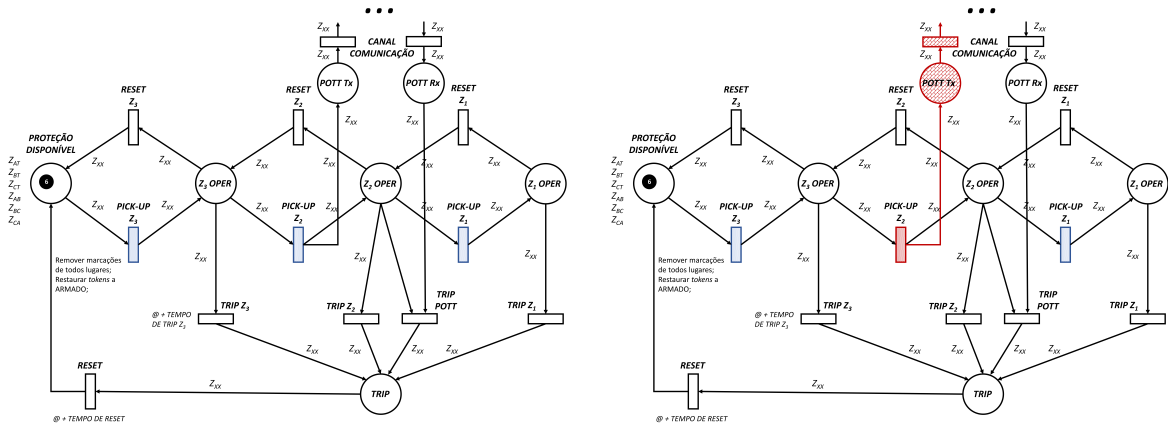
Nessa contagem, qualquer caminho por transições do tipo *reset* é eliminado, por sempre retornarem o sistema para um estado conhecido cujas transições associadas correspondem apenas a processos integralmente modelados, as ativações de zonas de proteção. Essa condição é essencial para que a técnica DFS possa ser utilizada para percorrer grafos (JUNGNICKEL, 2013), dado que impede a existência de ciclos na rede navegada. Além disso, as transições que precedem o *trip* do sistema são excluídas da contagem, por serem consideradas parte do processo da função da zona de proteção.

Assim, nessas considerações, a proteção de distância exemplo da Figura 15, com três zonas e esquema de teleproteção POTT, tem o erro de *trip* de segunda zona calculado. O sistema básico representativo do modelo desse IED e utilizado na análise é apresentado na Figura 15a, com as transições cujos processos são integralmente modelados (e, portanto, que são ponto de partida para determinação de *multiplicadores de erro*) hachuradas em azul. Para avaliação de um sinal de *trip* provocado por ativação do sistema POTT, considera-se a existência de dois dispositivos de proteção de distância independentes, como na Figura 15a, conetadas entre si através de um canal de comunicação, com o lugar Tx de uma alimentando o Rx da outra, e vice-versa.

Com a conexão entre dispositivos estabelecida, o relé que ordena o comando de abertura de disjuntores terá erros associados ao próprio processo de ativação de sua segunda zona de proteção e a transmissão de sinal assistido por canal de comunicação entre os terminais da linha de transmissão, conforme destacado em vermelho na Figura 15b. Assim,

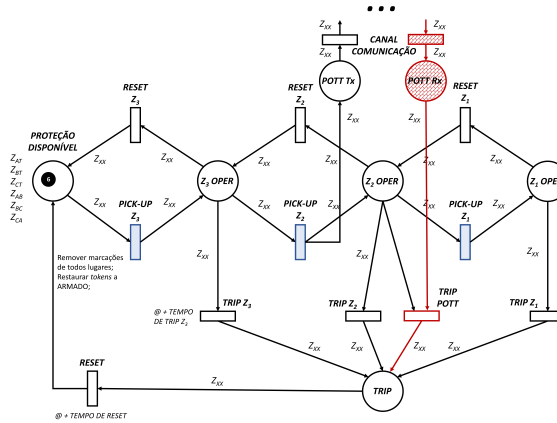
¹ Na teoria de grafos, uma árvore é uma estrutura de grafo não direcional em que quaisquer dois vértices se conectam exatamente por um caminho ou, equivalentemente, é um grafo conexo acíclico e não direcional (DEO, 1974).

Figura 15 – Exemplo de propagação de erro utilizada.



(a) Sistema básico

(b) Erros associados a geração de Tx



(c) Erros associados ao recebimento Rx

Fonte: o autor

tem-se dois processos distintos como fonte de erros associados ao envio desse comando, resultando em $n = 2$.

O recebimento do comando de disparo assistido é apresentado na Figura 15c, em que se percebe a existência de duas fontes de erro, associadas ao canal de comunicação e ao comando de *trip*. Dessas fontes, o erro associado ao esquema remoto já está modelado para a emissão do sinal Tx , de forma que não é necessário contabilizá-lo novamente. Por definição, o erro associado ao comando de *trip* é tratado em conjunto com o processo de disparo da zona que o provoca, não sendo contabilizado, para evitar duplicação de seu efeito, para a ativação de zona dois considerada. Assim, o erro total de *trip* por proteção assistida é determinado pela combinação do erro associado ao recebimento do sinal permissivo e do processo de disparo de zona dois que o provocou, como a soma dos processos da Figura 15b e Figura 15c.

A combinação desses processos resulta em um *multiplicador de erro* $n = 2$, habilitando a reescrita de (5.2) como $\delta_{erro} = 2\delta_{erro\ usuário}$. Com essa relação, os comandos de

trip são julgados no diagnóstico por comparação com o valor de tolerância $2\delta_{erro\ usuário}$, indiretamente determinado por contagens de transições.

O processo de erros exemplificado é aplicado a todos sinais de proteção não diretamente modelados, mas disponíveis via simulação. Assim, viabiliza-se a avaliação de múltiplas funções da proteção de distância, cada uma com seu erro dinamicamente determinado pela rede de Petri de seu IED.

5.1.2 Determinação das Diferenças Temporais

As diferenças temporais entre ativações e desativações de cada sinal simulado e seu correspondente extraído de campo são a forma mais simples de estabelecer igualdade entre curvas (LOPES et al., 2018). Nela, é determinado pelo usuário um valor de variação máxima entre as duas formas de onda, o erro aceitável $\delta_{erro\ usuário}$, cujo valor absoluto é comparado com o módulo da diferença observada entre bordas dos sinais. Sendo esse valor inferior ao limite estabelecido como aceitável, as operações são ditas iguais e é assumido que quaisquer variações entre as formas de onda são oriundas de imperfeições ou descasamentos entre o modelo implementado para diagnóstico e o dispositivo real.

Esse processo é baseado em Lopes et al. (2018), em que o critério de igualdade é determinado pelo usuário e utilizado para diagnóstico das operações de proteção do sistema. A diferença, contudo, está associada à aplicação de *multiplicadores de erro* oriundos da rotina de propagação de erros ao valor $\delta_{erro\ aceitável}$, o que permite a avaliação de sinais não diretamente modelados, que surpassam as funções básicas da proteção.

Nessas considerações, a atuação da proteção é avaliada pela expressão

$$\left| Campo_{ativação|desativação} - Simulação_{ativação|desativação} \right| \leq n \cdot \delta_{erro\ usuário} \quad (5.3)$$

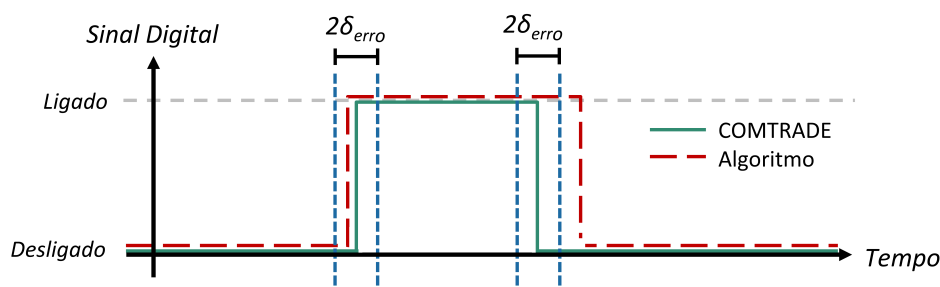
onde $Campo_{ativação|desativação}$ corresponde ao instante de ativação ou desativação do sinal obtido em campo e $Simulação_{ativação|desativação}$ ao instante equivalente nas bordas de subida ou descidas resultantes da simulação da solução *model-based*.

Assim, sendo a expressão (5.3) avaliada como verdadeira, a atuação da proteção nesse cenário é determinada correta e adequada, já que os sinais real e simulado são iguais, considerada a tolerância. No caso contrário, outros fatores serão avaliados no diagnóstico da proteção para determinar sua atuação como correta ou incorreta.

A determinação dessa diferença temporal absoluta pode ser explicada conforme a Figura 16. Nela, é mostrado, como exemplo, um possível sinal extraído de campo, em verde, e seu equivalente produzido pelo algoritmo, em vermelho, além da tolerância $2\delta_{erro}$, em azul, para as bordas de subida e descida dessa forma de onda. Nesse cenário, essa tolerância recebe o multiplicador 2, dado que são consideradas corretas ativações e/ou desativações que estejam, em relação ao sinal de campo, adiantadas ou atrasadas das bordas,

caracterizando um intervalo de comprimento cujo valor é o dobro de δ_{erro} . Se ambos sinais, simulado e de campo, tiverem as bordas de subida e descida contidas dentro de um mesmo intervalo de tolerância (linhas em azul), ele será avaliado como uma operação correta do sistema. Caso contrário, considera-se incorreta essa operação de proteção. Assim, a borda de subida da Figura 16 é determinada correta, dado que ambas estão contidas entre as curvas azuis, enquanto a borda de descida, em oposição, é considerada incorreta, por não ser respeitado o intervalo de tolerância.

Figura 16 – Exemplo de sinal simulado *vs.* real consideradas as tolerâncias definidas.



Fonte: o autor

5.1.3 Função de Ativação e Normalização Temporal

Nas situações em que a comparação temporal entre sinais não é conclusiva para o diagnóstico da proteção de distância, essa diferença absoluta será utilizada em outros cálculos que contribuirão para determinar a operação de um dispositivo como correta ou incorreta.

Para que esses valores sirvam como base comparativa para análise, é necessário primeiramente realizar sua normalização a um intervalo finito, tipicamente de zero a um, homogeneizando sua escala de variação. Esse processamento permite a melhor utilização dos resultados em operações de diagnóstico e a comparações entre diferentes valores e grandezas úteis para avaliação dos sinais.

A função de normalização aqui empregada é chamada de *função de ativação* por sua similaridade com o conceito de mesmo nome da área de ciência de dados. Em aprendizado de máquina, uma *função de ativação* é uma expressão que determina a operação de ativação de um *perceptron*, a unidade básica de construção de redes neurais (GRAUPE, 2013). É uma função não-linear (HEATON, 2012) e continuamente diferenciável (GRAUPE, 2013), responsável por limitar a saída numérica de um processo a determinado intervalo.

Assim, a expressão de normalização implementada está baseada na função sigmoide,

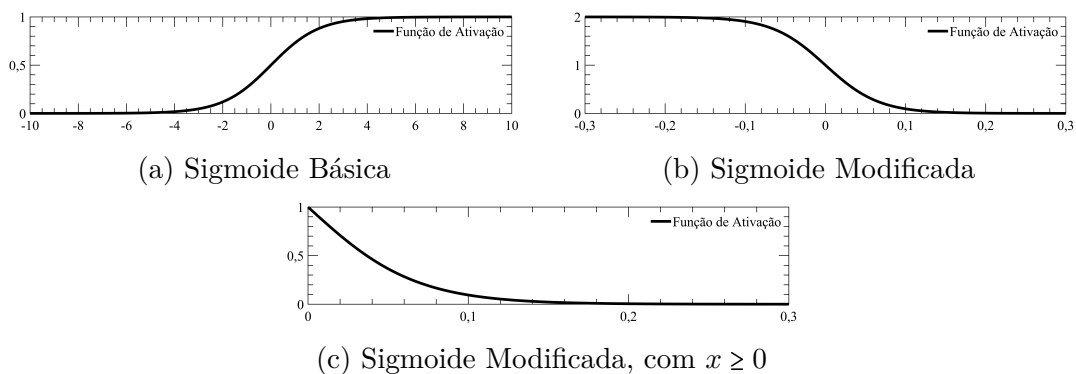
expressa por (GRAUPE, 2013; HEATON, 2012)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.4)$$

A sigmoide é uma função infinita no eixo x , com valores que tendem a 0 quando $x \rightarrow -\infty$ e 1 quando $x \rightarrow \infty$, com o valor de meio no ponto de origem ($x = 0$) (GRAUPE, 2013). Assim, é uma função cuja saída é sempre limitada ao intervalo entre zero e um, podendo ser utilizada na normalização para a diferença temporal.

Porém, as diferenças temporais típicas entre as formas de onda da proteção de distância do sistema modelado e do equipamento real são tipicamente pequenas, inferiores a $\pm 0,5$ segundos. Nesse cenário, as escalas usuais utilizadas para a função sigmoide não atendem bem ao problema proposto, visto que é uma função crescente (tenderia a unidade quanto maior fosse a diferença temporal) cujos valores estão muito distantes da unidade no intervalo de interesse, conforme verificado por sua forma de onda da Figura 17a. Assim, a aplicação direta de (5.4) é impossível, levando à necessidade de proposição de nova expressão de ativação.

Figura 17 – Funções sigmoide básica e modificada.



Fonte: o autor

Então, a expressão proposta para substituição da função sigmoide é

$$f(x) = \frac{-2}{1 + e^{-30x}} + 2 \quad (5.5)$$

cuja forma gráfica é apresentada na Figura 17b. Como a diferença de tempo absoluta será aplicada como entrada da expressão (5.5), apenas o eixo horizontal positivo é relevante, ou seja, $x \geq 0$, conforme Figura 17c. Por isso, sua forma gráfica é de importância para a determinação das operações de diagnóstico do sistema.

A função de ativação de (5.5) é caracterizada por grande valor de derivada para pequenos valores absolutos de diferença de tempos (de 0 até 0,1). Esse valor tende a zero quando o valor de x é superior a 0,1, sendo unitário na origem. Essa forma gráfica é capaz de garantir que, para pequenos desvios nos instantes de ativação e desativação entre os sinais

reais e simulados, o valor calculado seja rápida e vigorosamente penalizado, garantindo que na faixa de interesse ($0 \leq x \leq 0,1$) as variações sejam facilmente distinguíveis, fazendo com que valores próximos resultem em pontos suficientemente espaçados e distintos para análises.

Essa curva ainda é capaz de, para diferenças de tempo mínimas, produzir valores próximos à unidade, indicando menor afastamento temporal ente eles. Em contrapartida, valores grandes de x na função de ativação produzem resultados próximos de zero, em que não é necessário quantificar o quão distante estão as formas de onda, mas sim apenas identificar comportamento anormal no sinal e a diferença temporal relevante entre eles.

Com essa curva é possível, então, determinar um valor numérico para o afastamento temporal entre curvas, com números próximos à unidade indicando pequeno afastamento (ou grande proximidade temporal) e valores se aproximando de zero apontando grande afastamento (ou pequena proximidade temporal) dos sinais.

Assim, define-se uma escala normalizada para classificação da proximidade temporal entre sinais, que poderá ser utilizada na determinação de similaridade temporal entre as formas de onda das simulações e os dados de campo.

5.2 Semelhança Entre Curvas

A segunda abordagem utilizada para realização da comparação de curvas no processo de diagnóstico consiste na utilização de correlação cruzada. Matematicamente, essa ferramenta permite a obtenção de valores numéricos indicando a semelhança entre duas formas de onda, habilitando comparações essenciais ao processo de diagnóstico.

5.2.1 Correlação Cruzada

Matematicamente, a correlação cruzada quantifica o grau de semelhança entre dois sinais de tempo contínuo, tendo como base o deslocamento temporal que deve ser aplicado a algum deles para que as regiões de máxima similaridade entre as formas de onda se sobreponham (BRACEWELL, 1999; PAPOULIS, 2018). Assim, para dois sinais reais e contínuos $g(x)$ e $h(x)$, a correlação cruzada entre eles é expressa por (BRACEWELL, 1999; PAPOULIS, 2018)

$$f(x) = g \star h = \int_{-\infty}^{\infty} g(u-x)h(u) du \quad (5.6)$$

em que $f(x)$ é o valor da correlação.

É trivial perceber que a equação (5.6) se assemelha a expressões de convoluções entre dois sinais (BRACEWELL, 1999). Isso sugere que ela pode ser simplificada e reescrita com o uso de convoluções, o que é alcançado com mudanças de variáveis, conforme

(BRACEWELL, 1999)

$$\begin{aligned} f(x) = g \star h &= \int_{-\infty}^{\infty} g(u-x)h(u) du = \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(u+x) du \\ f(-x) = h \star g &= \int_{-\infty}^{\infty} h(u-x)g(u) du = \int_{-\infty}^{\infty} h(u)g(u+x) du \end{aligned} \quad (5.7)$$

que podem ser reescritas como

$$g \star h = g(-x) \star h(x) \quad (5.8)$$

Assim, por vias de (5.8), é possível reescrever o problema de correlação cruzada de (5.6) como um de convoluções (BRACEWELL, 1999; PAPOULIS, 2018). Essa possibilidade se mostra muito relevante devido à existência de implementações de cálculo numérico para convoluções, como a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) e a sua recíproca, a transformada inversa rápida de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform*, IFFT) (BRACEWELL, 1999).

Feitas essas considerações, a expressão (5.8) pode ser reescrita para maior performance computacional como

$$g \star h = \text{IFFT} \{ \text{FFT} \{ g_p(x) \} \} \cdot \text{FFT} \{ h_{p_{rev}}(x) \} \quad (5.9)$$

onde $g_p(x)$ é uma versão de $g(x)$ preenchida com zeros e $h_{p_{rev}}(x)$ é uma versão invertida no tempo e preenchida com zeros de $h(x)$. É desejável, ainda, normalizar (5.9) para um intervalo limitado de zero a um, de forma a habilitar comparações coerentes desses valores. Para tanto, a normalização será feita com o uso da norma euclidiana $\|\cdot\|$ das listas de valores de $g_p(x)$ e $h_{p_{rev}}(x)$, conforme (BRACEWELL, 1999; PAPOULIS, 2018)

$$g \star h = \frac{\text{IFFT} \{ \text{FFT} \{ g_p(x) \} \} \cdot \text{FFT} \{ h_{p_{rev}}(x) \}}{\|g_p(x)\| \cdot \|h_{p_{rev}}(x)\|} \quad (5.10)$$

Esse valor, então, habilita a criação de critérios para avaliação da semelhança entre curvas. Valores próximos à unidade na expressão (5.10) indicam formas de ondas muito similares, independentes do deslocamento temporal entre as curvas, podendo ser tomados como critério para os algoritmos de diagnóstico de proteção. Em oposição, valores próximos a zero indicam grande dissonância entre os sinais reais e os de referência, apontando resultados negativos para o processo de diagnóstico.

5.3 Cálculo dos Resultados Finais

Ao longo de todo capítulo, diferentes formas de se calcular e quantificar a semelhança entre curvas obtidas de oscilografias e de simulações foram apresentadas. Ainda assim, não foram estabelecidos procedimentos relacionados a essas métricas para diagnóstico da proteção.

Nessa seção, apresenta-se, então, a hierarquização dessas métricas de semelhança e o fluxo lógico de diagnóstico da rotina implementada. Assim, primeiro são avaliadas as diferenças temporais absolutas de sinais, que, se satisfeitas, permitem concluir igualdade entre formas de onda e determinar a resposta como correta. Caso esse teste não seja conclusivo, esse valor é normalizado pela função de ativação baseada proposta e combinado com a correlação cruzada calculada para os sinais, criando um valor único que pode ser comparado com critérios estabelecidos pelo usuário, em um processo qualitativo de diagnóstico das operações de proteção de distância.

Todo esse ciclo é descrito logo no início dessa seção. Também é apresentada a forma final de determinação do diagnóstico global de um dispositivo de proteção de distância e os sinais relevantes utilizados nessa análise. Por fim, algumas configurações finas possíveis para todos esses cálculos são apresentadas e comentadas.

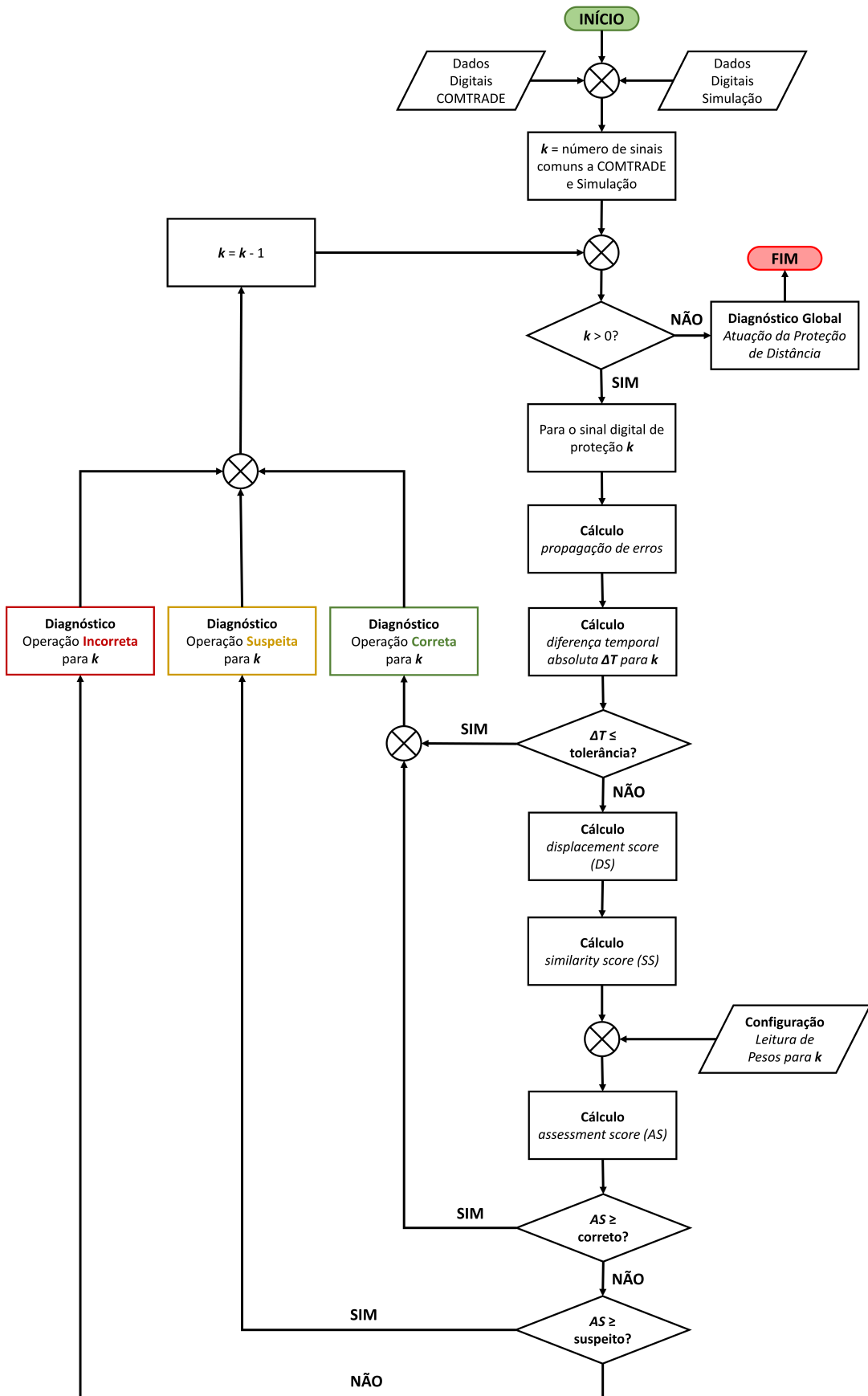
5.3.1 Hierarquização de Métricas de Semelhança

Na solução são utilizadas fundamentalmente duas métricas para determinação da igualdade de sinais e para conclusão do diagnóstico de sistemas: a comparação de diferenças absolutas dos sinais com tolerâncias determinadas pelo usuário e o cálculo de coeficientes associados às diferenças temporais e às formas de onda. Esses indicadores são avaliados de modo sequencial, em que primeiro os sinais são conferidos para igualdade e, caso não sejam, calculam-se coeficientes de similaridade que são comparados com critérios definidos pelo usuário para as faixas de tolerância do diagnóstico do sistema.

Todo esse procedimento de diagnóstico é detalhado na [Figura 18](#). Ele se inicia pelo pareamento dos sinais comuns extraídos dos registros reais de falta, via COMTRADE, e os resultados produzidos por simulação, cujo objetivo é determinar quais são as formas de onda que devem ser submetidas a raciocínios de *consistência* para avaliação. Uma vez pareados os sinais, o sistema executa um fluxo iterativo percorrendo os pares simulações-informações reais gerados. Para cada item k dessa lista, é executado o procedimento de verificação de semelhança das formas de onda. A primeira parte desse processo consiste no cálculo do erro associado à medição em avaliação, conforme [subseção 5.1.1](#). Com o erro determinado, o valor absoluto das diferenças de instantes de ativação ou desativação entre as formas de onda é calculado, produzindo o valor ΔT . Ele é, então, comparado à tolerância definida pelo usuário modificada por seus *multiplicadores de erro* determinados no processo de propagação de incertezas.

Nessa comparação, tem-se a primeira oportunidade de interrupção do fluxo de diagnóstico. Se os critérios apresentados na [subseção 5.1.2](#) forem atingidos, os sinais avaliados são considerados virtualmente idênticos. Sendo iguais, é possível determinar que o dispositivo em campo se comportou conforme previsto, resultando em um diagnóstico de operação correta para a função de proteção. Isso ocorrendo, a iteração é encerrada e

Figura 18 – Fluxograma descritivo da lógica de diagnóstico com as diferentes métricas.



Fonte: o autor

novo sinal será avaliado, recomeçando o ciclo.

Contudo, se a comparação de tempo não for respeitada, outros critérios para determinação de igualdade devem ser verificados. Primeiramente, calcula-se o *displacement score* (DS) ou pontuação de deslocamento tempo, que corresponde o resultado do processo apresentado na [subseção 5.1.3](#). Em sequência, o valor *similarity score* (SS) ou índice de similitude de curvas é computado, correspondendo à métrica indicativa de semelhança entre duas formas de onda, conforme apresentado na [seção 5.2](#).

Esses dois resultados, DS e SS, são combinados em uma soma ponderada para determinação de métrica única indicativa do quão iguais são os dados de campo e de simulação, a ser detalhada na [subseção 5.3.2](#). Como produto, a manipulação desses dois indicadores gera o *assessment score* (AS), que representa uma pontuação final indicativa do nível de semelhança entre dois sinais. O valor de AS para cada função de proteção é normalizado no intervalo de zero a um, permitindo sua comparação com faixas configuráveis que determinam o diagnóstico como correto, suspeito (carece de informações para melhor avaliar as formas de onda) ou incorreto.

Os intervalos para estabelecer as tolerâncias de avaliação do AS são determinados em processo iterativo do tipo tentativa e erro, para cada linha de transmissão (par de proteções terminais). Ele depende diretamente da qualidade e representatividade do modelo implementado na solução em relação aos IEDs em campo, podendo ser maior quanto maior for o grau da concordância simulação-equipamento real. Contudo, para garantir generalidade e o mínimo possível de configurações por parte do usuário, foram escolhidos valores de faixa mais dilatados, para contornar situações com divergências relevantes dos IEDs construídos na solução e sua contraparte real, de forma a representarem o maior número possível de equipamentos distintos. Assim, os valores utilizados para as tolerâncias comparadas com o AS e que geram bons resultados para a grande maioria dos modelos relés e IEDs, mesmo que de diferentes fabricantes, são

- **Operação Correta:** configuração típica no intervalo de 0,8 a 1,0, indicando grande proximidade temporal dos sinais comparados e/ou grande semelhança de forma de onda entre eles;
- **Operação Suspeita:** intervalo de 0,6 a 0,8, em que nem a proximidade temporal das curvas nem a semelhança de suas forma de ondas foram suficientemente relevantes para diagnóstico do sinal com os dados apresentados. Geralmente requer a aferição por pessoal especializado;
- **Operação Incorreta:** faixa de valores de 0,0 a 0,6, caracterizando sinais de grande diferença temporal e/ou formas de onda muito distintas.

Uma vez realizada a comparação de cada sinal individualmente, pode-se calcular o

diagnóstico global de relés e IEDs. Nessa etapa, conforme será apresentado na [subseção 5.3.2](#), são selecionados alguns sinais que compõem uma média ponderada, gerando novo valor normalizado que é indicativo da porcentagem dos sinais diagnosticados como corretos, incorretos ou suspeitos. Esse valor final é uma propriedade que resume o funcionamento total do sistema, considerando o conjunto de processos que o integram. Dessa forma, conclui-se o processo de avaliação das operações de distância em dispositivos de proteção ou em sistemas que monitoram linhas de transmissão.

5.3.2 Diagnóstico e Resultados Finais

São duas as etapas matemáticas utilizadas no processo de diagnóstico de um sinal, conforme apresentado no fluxograma da [Figura 18](#), uma para o cálculo do *assessment score* e outra para determinação da resposta global do sistema.

Nessa primeira etapa, uma soma ponderada distinta é realizada para cada sinal, a partir de seus valores de *displacement score* e *similarity score*, conforme configuração do usuário. Três são os fatores que podem ser modificados nessa operação: o peso da borda de subida do sinal w_{rising} , de sua borda de descida $w_{falling}$ e o de semelhança de curvas $w_{similarity}$.

Cada um desses valores interage de forma distinta com as variáveis do sistema. O w_{rising} é aplicado diretamente ao valor de DS para a borda de subida (se houver) das curvas, já processado e normalizado pela função de ativação. De maneira semelhante, o $w_{falling}$ é calculado com o valor de DS para a borda de descida das formas de onda (se houver), igualmente aplicado à função de ativação. Em contraste aos demais, o valor de $w_{similarity}$ é o único peso que atua sobre os valores de SS determinados. Assim, esse conjunto de regras e interações entre variáveis e pesos pode ser matematicamente representado por

$$assessment\ score = \frac{w_{rising}DS_{rising} + w_{falling}DS_{falling} + w_{similarity}SS}{w_{rising} + w_{falling} + w_{similarity}} \quad (5.11)$$

com DS_{rising} correspondendo ao valor do *displacement score* da borda de subida do sinal (se houver), $DS_{falling}$ o de sua borda de descida (se existir) e SS indicando o *similarity score* para o sistema.

Uma vez calculado o valor para AS, é possível diagnosticar o sinal em relação ao previsto seguindo os passos da [subseção 5.3.1](#). Especificamente, avalia-se sua forma de onda e seu *assessment score* conforme os intervalos e tolerâncias determinados para operações corretas, incorretas ou suspeitas da função de proteção. Esse valor ainda é utilizado no cômputo da resposta global do dispositivo.

A resposta final do sistema, de maneira semelhante à determinação do *assessment score*, também é obtida por uma soma ponderada de fatores. Nessa situação, porém, esse somatório é composto pela ponderação dos resultados da avaliação de múltiplas formas de

onda, escolhidas por configuração (não sendo necessário utilizar todos os sinais disponíveis, podendo eliminar, por exemplo, aqueles de multiplicadores de erros superiores a unidade) e com pesos determinados pelo usuário. Assim, matematicamente, esse cálculo global é dado por

$$score = \frac{1}{\sum_i w_i} \sum_i (w_i \cdot assessment\ score_i) \quad (5.12)$$

em que *score* é o valor final indicativo da operação global do IED, *assessment score_i* é o valor de AS para os sinais *i* escolhidos para essa avaliação e *w_i* é seu peso correspondente, não restrito a $\sum_i w_i = 1$.

O *score* final calculado por (5.12) pode ser avaliado pelas mesmas faixas de intervalo usadas para o AS dos sinais. Nessa situação, porém, os resultados desse cálculo responderão pelo comportamento global da proteção frente ao evento analisado.

No cálculo global, conforme expressão (5.12), é dado grande peso aos sinais escolhidos para integrar a avaliação do equipamento de proteção. Assim, é necessário que essas curvas sejam as mais representativas possíveis do comportamento esperado frente ao evento de interesse, refletindo adequadamente os comportamentos previstos para os dispositivos reais.

Dada essa consideração, é recomendável que sejam escolhidos os sinais diretamente modelados nos IEDs da rotina desenvolvida, para garantir o melhor controle do comportamento do sistema na geração do resultado. Além dessas ondas serem diretamente modeladas, elas são base para determinação das características dos demais sinais existentes nos IEDs modelados, quando não os ocasionam diretamente. Assim, garantir que as ativações de zonas de proteção modeladas estejam corretas, conforme sugestão, é uma forma de indiretamente exigir que as formas de onda decorrentes estejam minimamente corretas, permitindo uma validação indireta desses outros sinais.

Esse processo de determinação do *score* final encerra a execução da rotina de diagnóstico da técnica *model-based* com raciocínios de *consistência* utilizada. Cabe apenas apresentar algumas configurações adicionais do sistema, úteis para controlar cálculos e processos na ferramenta.

5.3.3 Outras Configurações

Diversas configurações realizam o controle do fluxo e das operações de diagnóstico de sinais da proteção de distância, sendo algumas das mais relevantes aqui apresentadas. Primeiro, para cada sinal especificado para ser diagnosticado, devem ser configurados pesos para os deslocamentos temporais de suas bordas de subida e descida, bom como para o coeficiente de similaridade de forma de onda. Os significados desses coeficientes foram apresentados na [subseção 5.3.2](#), sendo necessária a especificação de seus valores típicos.

Esses valores são definidos de forma que o somatório de pesos w para o sinal i seja igual à unidade, $\sum_i w_i = 1$. Assim, para cada sinal diagnosticado, a expressão (5.11) pode ser reescrita como

$$\textit{assessment score} = w_{\textit{rising}}DS_{\textit{rising}} + w_{\textit{falling}}DS_{\textit{falling}} + w_{\textit{similarity}}SS \quad (5.13)$$

O bom funcionamento do sistema exige que os pesos de (5.13) sejam adequadamente estabelecidos, para preservar a importância das características mais relevantes da função de proteção no cômputo do resultado final. Nesse sentido, é a borda de subida do sinal o principal fator de influência no funcionamento da proteção (LOPES et al., 2018), por determinar o início das aplicações das diversas funções de relés e IEDs. Assim, deve ser configurada com maior peso que a soma dos demais, de forma que $w_{\textit{rising}} \geq w_{\textit{falling}} + w_{\textit{similarity}}$, respeitando $\sum_i w_i = 1$. Nesse cenário, o valor base (*default*) para esse parâmetro é de 0,6.

O segundo peso de maior relevância no diagnóstico de uma função de proteção é o coeficiente de similaridade de forma de onda. Esse valor indica quão similares são dois sinais, levando em consideração seus instantes de ativação e desativação, bem como sua duração. Assim, está diretamente associado à borda de subida da forma de onda, critério mais relevante, mas também à sua borda de descida, correspondendo a um critério intermediário entre esses dois extremos. Nesse sentido, seu valor de referência é especificado como metade daquele da borda de subida, ou seja, 0,3.

Por fim, o peso da borda de descida é o parâmetro menos relevante, com valor *default* de 0,1. Isso se deve ao fato de que o tempo total de atuação de uma função de proteção é tipicamente desprezível desde que seja garantida duração suficiente para sua correta inicialização e execução, o que é primariamente determinado pela borda de subida do sinal. Assim, esse peso tem menor importância na definição do comportamento final do IED, sendo pouco determinante no diagnóstico do processo de interesse, à exceção de sua pequena contribuição para o cômputo do coeficiente de semelhança entre formas de onda de sinais.

Além dessas três informações fundamentais, determinadas por sinal, é possível também configurar o nome associado às grandezas do arquivo COMTRADE, para que se possa estabelecer correspondência entre os dados de campo e as informações processadas pelo algoritmo. Nessa configuração, ainda é possível determinar expressões matemáticas para aplicação prévia às operações de canais, avaliadas através de rotina do tipo *shunting-yard* (DIJKSTRA, 1961), permitindo a composição dos valores finais de alguns canais distribuídos, como correntes e tensões em medições em série ou derivação, por exemplo.

Nessas configurações ainda é possível selecionar quais sinais serão considerados para o processo de diagnóstico global da ocorrência, bem como seus pesos nessas situações. Também é possível definir critérios utilizados para determinação de uma operação como

correta, suspeita ou incorreta, além de outras propriedades do algoritmo desenvolvido.

Com o processo de modelagem dinâmica da função de proteção de distância elaborado e as rotinas de diagnóstico especificadas para sinais e comportamentos globais do dispositivo de proteção definidas, é necessário apenas realizar a validação da solução proposta. Esse processo é apresentado no [Capítulo 6](#), seguido por resultados com oscilografias reais de linhas de transmissão.

6 Validação da Solução Proposta

O sistema de diagnóstico desenvolvido para operações de proteção de distância em relés e IEDs exige que esses dispositivos sejam adequadamente modelados para os eventos de interesse. Isso foi feito através de redes de Petri temporais coloridas, capazes de representar seus comportamentos dinâmicos, e da combinação de técnicas de estimação fasorial e de tratamentos geométricos para descrição de suas operações lógicas.

Assim, é necessário assegurar que a modelagem realizada consiga representar bem os dispositivos de campo. Contudo, não é trivial validar a solução desenvolvida com equipamentos reais, sendo uma alternativa o uso de simulações de proteções como fonte de informações para alimentação das rotinas desenvolvidas.

Essas simulações foram realizadas por um *software* de cálculo de transitórios eletromagnéticos, o ATP, através de seus modelos padrões de dispositivos de proteção. Porém, para que essas representações descrevam adequadamente os comportamentos de relés e IEDs reais, é necessário que englobem todas as etapas para simulação discutidas no [Capítulo 3](#). Assim, é obrigatória a adição de etapas de pré-processamento de dados para correta modelagem desses equipamentos, conforme apresentado na [seção 6.1](#).

Os IEDs construídos no ATP foram submetidos a faltas no circuito proposto pelo [IEEE Power System Relaying Committee \(2004\)](#) para testes de modelos de dispositivos de proteção em programas do tipo EMTP. As falhas utilizadas representavam diferentes cenários e tipos de eventos, capazes de estimular diferentes comportamentos de relés e IEDs, sendo apresentadas na [seção 6.2](#). Por fim, para comprovação da efetividade da solução proposta, os resultados desses testes para ambos terminais da linha de transmissão são analisados e discutidos.

6.1 Modelagem de IEDs no ATP

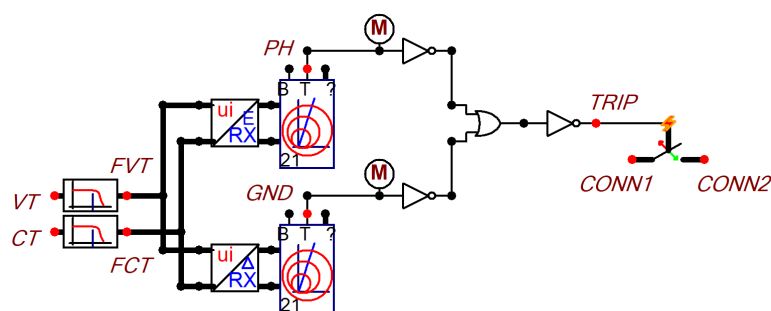
Um modelo dinâmico de dispositivo de proteção de distância para uso em programas do tipo EMTP é composto, conforme apresentado na [seção 3.1](#), de cinco blocos funcionais básicos. Esses blocos executam as funções de transdutores TC e TP para as correntes e tensões do sistema, a filtragem e tratamento dos sinais, a amostragem e conversão para grandezas digitais das formas de onda, o cômputo dos fasores (quando necessário) e as dinâmicas das decisões da proteção.

O ATP conta com modelos de transformadores que podem incluir características não-lineares ou ideais, sendo uma ferramenta completa para utilização como transdutores, TCs ou TPs, nas simulações de validação. Considerando o objetivo dessas simulações,

é desejado configurar o sistema com o menor número possível de pontos de divergência entre os modelos do ATP e da solução proposta, para que quaisquer diferenças estejam associadas a variações nas modelagens, culminando no uso de transdutores ideais, que aplicam apenas multiplicadores (relações de transformação) lineares aos sinais registrados. Assim, não é necessário descrever esses componentes no modelo de IED construído, que pode utilizar diretamente os valores já em níveis adequados apenas com a aplicação dessas relações de transformação. O segundo estágio de tratamento de sinais foi confeccionado por filtro passa-baixa com frequência de corte de 300 Hz, ganho unitário e ordem 3, limite do *software*, já disponível no ATP (HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019).

Esse filtro é o mais semelhante possível ao desenvolvido, buscando melhor representar as configurações do modelo de IED implementado. Desse modo, quaisquer variações dos sinais condicionados de saída podem ser explicadas pela ordem dos filtros, distintas entre a solução proposta (ordem quatro) e o ATP (ordem três, limitada pelo simulador), dado que ambos são do tipo Butterworth. Esse elemento é apresentado no modelo de IED utilizado da Figura 19, recebendo como entrada os valores provenientes dos transformadores de medição, VT e CT , e gerando os valores filtrados FVT e FCT .

Figura 19 – Modelo de IED utilizado no ATP para validação do sistema.



Fonte: o autor

O estágio seguinte do modelo de relé no ATP corresponde a amostragem e conversão dos sinais "analógicos" da simulação em valores digitais para utilização nos algoritmos da proteção. Para o caso específico do ATP, essa etapa de amostragem é realizada em conjunto com a estimação fasorial, através dos blocos RX (HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019). Mais ainda, esses blocos calculam a impedância de falta no ponto de medição, fornecendo valores das partes reais (resistências) e imaginárias (reatâncias) desse grandeza como saída (HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019), que podem ser aplicadas diretamente aos processos decisórios de relés e IEDs. No ATP, essa estimação fasorial pode ser realizada por dois algoritmos, de livre escolha: a transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*, DFT) recursiva ou a transformada rápida de Fourier (FFT) Radix2 - 8 (HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019), caracterizados por serem, respectivamente, mais rápida e instável (isto é, em determinadas condições, o resultado

pode se afastar do correto conforme o número de iterações), e de maior robustez, porém mais lento. Na [Figura 19](#), esse processo é representado logo após os pontos de filtragem *FVT* e *FCT*.

Com as impedâncias de curto-circuito calculadas, resta apenas executar a lógica decisória do relé. Esse processo é realizado no bloco *Distance Circl. 21* do ATP ([HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019](#)), apresentado em pares correspondentes às unidades de fase e terra da proteção, que produzem como saída os valores *PH* e *GND*, respectivamente, indicativos do comando de *trip* dessa proteção, como apresentado na [Figura 19](#).

Todos esses processos já atenderiam às condições necessárias para um bom modelo de dispositivo de proteção, conforme descrito na [seção 3.1](#), sem necessidade de maiores adições. Porém, para que fosse possível utilizar chaves controladas para representação de disjuntores nas simulações do ATP, é necessário combinar as unidades de fase e terra em um único sinal de controle a ser associado à chave.

Para unificar esses comandos, é utilizada uma porta lógica do tipo OR conectada a uma chave controlada, que realiza a abertura nos pontos de conexão *CONN1* e *CONN2* da linha de transmissão, interrompendo o fluxo de correntes. É importante destacar que, no caso do ATP, os sinais produzidos pelos blocos lógicos de proteção de distância são normalmente ativos ([HØIDALEN; PRIKLER; PEÑALOZA, 2019](#)), de forma que é necessário um conjunto de portas lógicas NOT para melhor entendimento do sinal *TRIP* e compatibilidade com as chaves controladas disponíveis. Esse uso, porém, em nada interfere na resposta do sistema, que permanecerá inalterada nas simulações.

Assim, com o relé apresentado na [Figura 19](#) é possível realizar a validação dos modelos desenvolvidos para proteção. Porém, como o bloco de um relé no ATP é limitado, produzindo apenas sinais de comandos de *trip*, não será possível testar todas funcionalidades da solução desenvolvida, o que terá que ser feito com registros oscilográficos reais.

Também é válido comentar que podem surgir diferenças numéricas entre os resultados produzidos pelo ATP e os apresentados pelo modelo desenvolvido. Essas variações estão associadas às diferenças entre técnicas numéricas utilizadas em cada relé, não sendo grandes o suficiente para causarem alterações nos diagnósticos do sistema. Inclusive, isso atesta a robustez e generalidade do algoritmo elaborado, visto que é possível avaliar sistemas como caixas-pretas, sem conhecimento de suas estruturas internas.

Todas essas conclusões e limitações são apresentadas em detalhes na [seção 6.3](#).

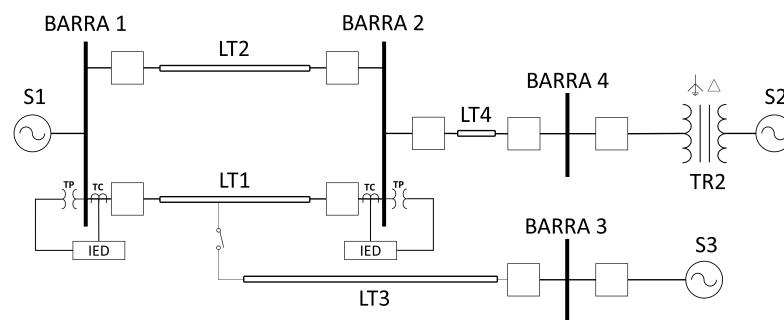
6.2 Circuito para Validação

Para garantir que os modelos de relés da abordagem *model-based* desenvolvida se comportem bem em transitórios de faltas reais é necessário que sua validação seja

executada em um sistema de teste cujas condições sejam próximas às de sistemas de potência existentes (IEEE Power System Relaying Committee, 2004). Por isso, é utilizado o sistema especificado em IEEE Power System Relaying Committee (2004) para teste de modelos de relés desenvolvido para programas do tipo EMTP.

O sistema de referência de IEEE Power System Relaying Committee (2004) é apresentado na Figura 20. Esse circuito é composto por três fontes, $S1$, $S2$ e $S3$, sendo duas delas ($S1$ e $S3$) configuradas como ideais, em 230 kV, e uma ($S2$) representada como máquina síncrona de 24 kV e 830 MVA (IEEE Power System Relaying Committee, 2004).

Figura 20 – Circuito de referência para testes de relés em programas do tipo EMTP.



Fonte: adaptado de IEEE Power System Relaying Committee (2004, Figura 19)

Conectando esse gerador à linha de transmissão $LT4$ está um transformador não-linear de dois enrolamentos, aterrado em conexão Y- Δ . Sua potência nominal é de 725 MVA, com enrolamento de alta tensão especificado para uma tensão de 229,893 kV e o de baixa tensão para 22,8 kV.

Duas linhas de transmissão, $LT1$ e $LT2$, são mutuamente acopladas e possuem o mesmo comprimento de $LT3$ e $LT4$, de 72,4205 km (ou 45 milhas), todas confeccionadas com condutores Marigold 1113 kmil AA, com raio de 3 cm e resistência em 50 °C à corrente contínua de 0,09222 Ω /milha (IEEE Power System Relaying Committee, 2004). Na linha de transmissão $LT1$, é especificado um terminal de saída trifásico que a conecta à $LT3$, em aproximadamente 24,1402 km (15 milhas) da Barra 1.

As linhas $LT3$ e $LT4$ foram modeladas utilizando o circuito pi-equivalente, com parâmetros concentrados, na frequência de 60 Hz. Em contrapartida, as linhas de circuito duplo, $LT1$ e $LT2$, utilizam modelos de parâmetros distribuídos dependentes da frequência (IEEE Power System Relaying Committee, 2004).

Por fim, o circuito proposto conta ainda com grande número de chaves e disjuntores que permitem a simulação e análise de diferentes configurações. Nele, também é apresentada a posição dos IEDs utilizados na validação, conectados às barras 1 e 2 através dos dispositivos transdutores TC e TP da Figura 20 e com relações de transformação de 2000:1

e 2000:5, respectivamente.

Embora em [IEEE Power System Relaying Committee \(2004\)](#) os transformadores de corrente e potencial sejam modelados em detalhes, contando até com comportamentos não lineares, para as avaliações dos modelos desenvolvidos para diagnóstico de proteção serão utilizados transformadores ideais, caracterizados apenas por suas relações de transformação. Esse cuidado é tomado para reduzir o número de variáveis na simulação, diminuindo os pontos de variações, para que eles possam ser correlacionadas apenas aos modelos desenvolvidos.

Utilizando esse circuito foi possível simular faltas internas de todo tipo na rede. Nesses casos, foram utilizados os modelos discutidos na [seção 6.1](#) para simulação no ATP, cujos resultados foram comparados com os produzidos no *software* desenvolvido, em busca de semelhanças entre ambos, garantindo a representatividade da solução proposta para diferentes modelos de relés. Todas as faltas avaliadas são apresentadas na [seção 6.3](#).

6.3 Resultados

O circuito para validação dos modelos de dispositivos de proteção confeccionados é apresentado na [Figura 20](#), onde os IEDs são posicionados nas barras 1 e 2 para monitorar a linha de transmissão *LT1* através das medições obtidas por TCs e TPs a ela conectados. Nesse processo, os modelos de referência utilizados no ATP para a proteção de distância foram construídos conforme [seção 6.1](#), utilizando-se sempre as mesmas configurações e parâmetros para os dispositivos nas rotinas do tipo EMTP e no *software* desenvolvido.

Para esse processo, o principal interesse reside na avaliação da representatividade dos modelos de relés desenvolvidos em comparação com os existentes no ATP. Por isso, a impedância no ponto de medição dos equipamentos de proteção é relevante, servindo como indicativo da precisão das funções de estimação fasorial implementadas, além das lógicas de proteção definidas para o sistema. Contudo, os modelos desse tipo de proteção disponíveis no ATP são capazes de simular apenas o comando de decisão de *trip* ou não-*trip*, não sendo possível realizar a validação direta dos comportamentos dinâmicos dos sinais dos IEDs.

Assim, as dinâmicas da proteção serão avaliadas com exemplos reais, utilizando oscilografias de faltas em linhas de transmissão de uma concessionária, no [Capítulo 7](#). Em decorrência, será utilizado como critério de validação apenas a impedância de falta entre o sistema e o ATP. Isso não deve causar grandes impactos nos modelos desenvolvidos, dado que o principal parâmetro descritivo da proteção de distância é justamente a impedância calculada.

Em todos os cenários de falta considerados, a derivação entre as linhas de transmis-

são *LT1* e *LT3* manteve a conexão entre ambas, através do *jumper* na [Figura 20](#). Em todos os cenários, também, foram mantidas as proteções de distância com a mesma configuração, com duas unidades do tipo *MHO* ([ZIEGLER, 2011](#)), compondo a primeira e a segunda zonas, respectivamente.

Essas zonas de proteção foram configuradas com valores típicos utilizados para seu alcance em relação à impedância de sequência positiva da linha. Para a zona 1, foi utilizado um valor de 80 % dessa impedância, sem a aplicação de nenhum atraso de tempo, enquanto a zona 2 foi configurada com 140 % da impedância de sequência positiva, com um atraso programado de 0,2 segundos, aplicado tanto a proteção de distância de terra quanto à de fase. Tais ajustes para a proteção são critérios base, tipicamente utilizados em linhas de transmissão reais, que poderiam ser alterados conforme a necessidade e o problema em análise.

Nessas configurações de proteção, foram aplicadas múltiplas faltas à linha de transmissão *LT1* com posições, tipos e impedâncias variando arbitrariamente, representando faltas monofásicas-terra, bifásicas, bifásicas-terra, trifásicas e trifásicas-terra, resultando em um total de 11 tipos de eventos distintos. As características de todas as faltas utilizadas para validação são apresentadas na [Tabela 7](#), sendo a distância e a impedância de cada uma escolhida em função da sensibilização da primeira zona dos relés em ambos os terminais da linha de transmissão, dado que não é possível, com as ferramentas disponíveis no ATP, desenvolver esquema de *trip* assistido.

Tabela 7 – Cenários de falta utilizados para validação

Falta	Descrição		
	Tipo	Posição	Impedância de Falta
Falta monofásica-terra	AT	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	1,5 Ω
	BT	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	0 Ω
	CT	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	0,5 Ω
Falta bifásica	AB	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	1,5 Ω
	BC	48,28 km (30 milhas) da Barra 1	0,5 Ω
	CA	48,28 km (30 milhas) da Barra 1	0,01 Ω
Falta bifásica-terra	ABT	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	15 Ω
	BCT	48,28 km (30 milhas) da Barra 1	1 Ω
	CAT	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	5 Ω
Falta trifásica	ABC	48,28 km (30 milhas) da Barra 1	1 Ω
	ABCT	24,14 km (15 milhas) da Barra 1	10 Ω

Tipicamente, as resistências de faltas em sistemas elétricos de potência tendem a apresentar valores reduzidos, de modo semelhante aos da [Tabela 7](#), especialmente em

alguns cenários, como em falhas derivadas de descargas atmosféricas. Contudo, em diversas situações, podem ser registrados valores elevados para essas impedâncias, como em queimadas ou quando há contato acidental com vegetação. Esses casos representam situações limítrofes, não sendo necessária sua reprodução na validação da solução desenvolvida, dado que nela é essencial apenas que as impedâncias de falta sejam estimadas e as proteções sensibilizadas.

Para todas essas faltas, foi calculada a impedância percebida pelos dispositivos de proteção em cada terminação da linha de transmissão *LT1* no ATP e na solução desenvolvida, utilizando sempre a mesma abordagem. Nela, o valor dessa impedância é determinado como a média simples das últimas amostras em um ciclo de medição do dispositivo em 60 Hz, tomado após ser atingido o estado estacionário de falta e anterior à abertura do disjuntor. A comparação desses resultados produzidos é apresentada nas seções 6.3.1 e 6.3.2, em que, especialmente para os casos trifásicos, é representada apenas a primeira impedância calculada pelo relé a causar o *trip* nas duas situações.

6.3.1 IED na Barra 1

Para o dispositivo de proteção na Barra 1 da Figura 20, foram calculadas as impedâncias de curto-circuito por três métodos distintos: o utilizado na solução desenvolvida e as duas abordagens presentes no ATP. Todas as impedâncias obtidas nesse processo de validação, bem como as zonas de proteção dos relés utilizados são apresentadas na Figura 21.

Em todos os cenários de eventos da rede, considerando as proteções adequadamente ajustadas com os mesmos parâmetros no ATP e no algoritmo desenvolvido, os valores calculados para as impedâncias percebidas pelo IED são muito similares, quase sobrepostos, à exceção de pequenos desvios. Essas variações se fazem presentes inclusive entre as próprias impedâncias determinadas pelos dois métodos do ATP, FFT Radix2 - 8 e DFT, que também apresentam desvios.

Como os desvios nos valores calculados se fazem presentes inclusive entre as diferentes soluções disponíveis no ATP, pode-se considerar esse comportamento como decorrente das diferenças naturais nas técnicas de estimação fasorial utilizadas. Assim, as abordagens de mínimos quadrados (usada no trabalho) e FFT Radix2 - 8 (ATP), por serem mais robustas, apontam valores extremamente similares entre si, enquanto a metodologia de DFT (ATP), caracterizada por ser menos robusta, pode causar variações, explicando as diferenças observadas para esses valores.

Inclusive, em alguns cenários de falta, o algoritmo de cálculo de impedância no caminho de falta DFT não converge para um valor apropriado, especialmente para eventos do tipo fase-terra e trifásicas. Nesses cenários, o desvio é tanto que, de modo geral, as

impedâncias calculadas não coincidem nem com o algoritmo FFT Radix2 - 8, nem com a solução proposta. Assim, assume-se que os desvios nessa abordagem prejudicam os valores calculados, justificando o uso de peso menor dessa técnica na validação da solução.

Todo esse comportamento é visível na [Tabela 8](#). Nela, é possível verificar menores desvios percentuais da abordagem utilizada no trabalho em relação à técnica mais robusta do ATP, a FFT Radix2 - 8, conforme previsto. Esses desvios são tipicamente inferiores a 1 %, indicando grande concordância entre as metodologias utilizadas, apontando para validade da solução proposta no que tange à estimação fasorial, ao menos.

Em oposição, a [Tabela 9](#) indica desvios percentuais maiores entre a abordagem de mínimos quadrados, empregada na solução, e a DFT, utilizada no ATP. Esse comportamento é esperado, pela maior chance de desvio e menor robustez prevista para a DFT. Ainda assim, é possível ver concordância entre a solução proposta e o ATP, indicando validade para a implementação de estimação fasorial aplicada.

Nesse sentido, a concordância entre a ferramenta utilizada e as simulações no ATP, para dois algoritmos distintos, indica a validade do modelo de estimação fasorial utilizado. Para um parecer completo, no entanto, é necessário validar os fasores calculados pelo IED na outra ponta da linha de transmissão, a Barra 2.

6.3.2 IED na Barra 2

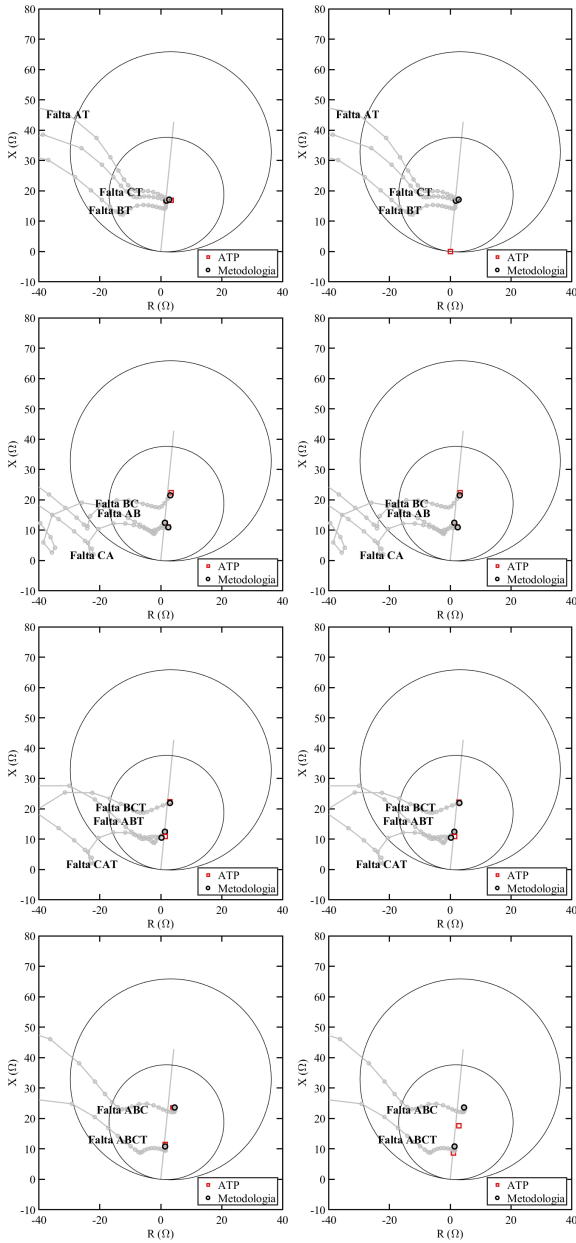
As impedâncias também foram calculadas com três métodos distintos para a Barra 2 da [Figura 20](#): as duas abordagens disponíveis no ATP e a desenvolvida no trabalho. Graficamente, os resultados desses valores obtidos na validação são apresentados, juntamente com as zonas de proteção dos IEDs, na [Figura 22](#).

Como na Barra 1, as estimções fasoriais calculadas na abordagem utilizada, para todos os eventos na Barra 2, produzem valores de impedância muito semelhantes aos do ATP, com desvios mínimos. Essas variações estão associadas à robustez das técnicas utilizadas, de modo semelhante ao apresentado na [subseção 6.3.1](#).

Os desvios percentuais das impedâncias medidas na Barra 2 (em relação ao ATP) são inferiores a 1 %, de forma semelhante aos resultados obtidos para a Barra 1, em ambas as situações. Assim como naquela situação, valem as explicações para os desvios conforme a abordagem de estimação fasorial utilizada.

As semelhanças entre os resultados encontrados para os IEDs nas Barras 1 e 2 indicam grande adequação do modelo desenvolvido para a determinação de impedância de falta por estimação fasorial. Assim, é possível utilizar esse modelo, em conjunto com redes de Petri e as rotinas de avaliação das operações de proteção, para diagnóstico de eventos reais em linhas de transmissão, conforme exemplificado no [Capítulo 7](#).

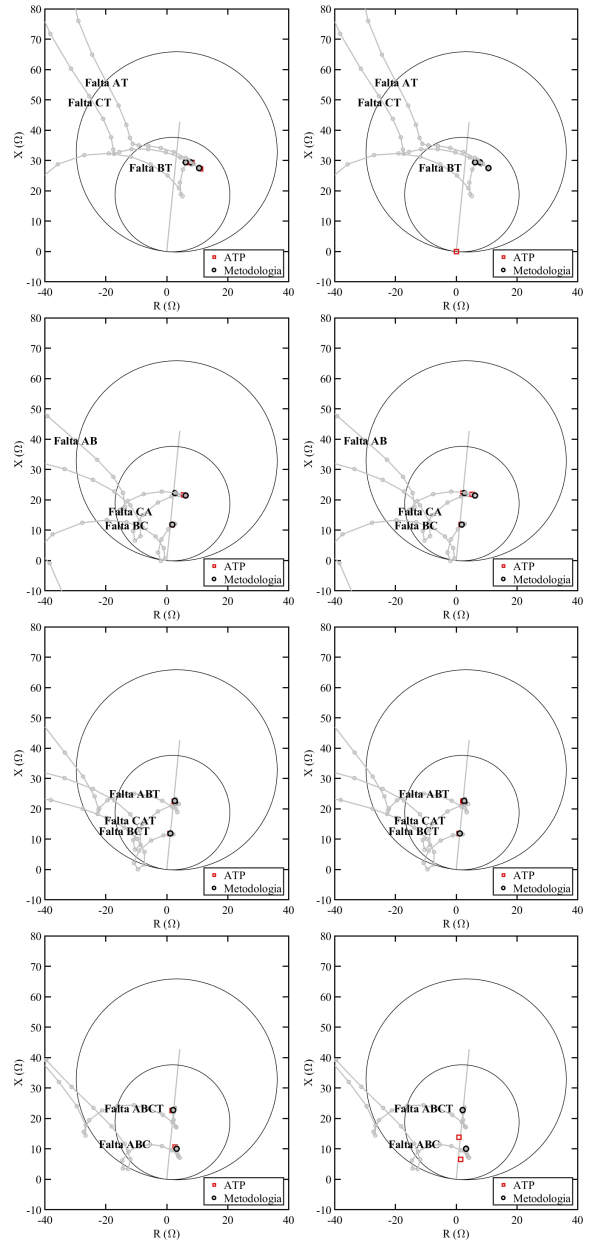
Figura 21 – Solução proposta *vs.* ATP para impedância calculada pelo relé na Barras 1.



(a) FFT Radix2 - 8

(b) DFT

Figura 22 – Solução proposta *vs.* ATP para impedância calculada pelo relé na Barra 2.



(a) FFT Radix2 - 8

(b) DFT

Fonte: o autor

Tabela 8 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e FFT Radix2 - 8 na Barra 1.

Cenário de Falta		Impedância Calculada		Desvio de Módulo	
		Solução Proposta (Ω)	ATP (Ω)	Valor Absoluto (Ω)	Percentual (%)
Falta monofásica-terra	AT	2,779 + j17,125	3,431 + j16,923	0,653	-0,474
	BT	1,856 + j16,772	1,774 + j16,734	-0,081	-0,279
	CT	2,397 + j16,922	2,356 + j16,926	-0,041	-0,011
Falta bifásica	AB	2,474 + j10,949	2,488 + j11,019	0,014	0,630
	BC	3,137 + j21,485	3,420 + j22,342	0,282	3,934
	CA	1,351 + j12,455	1,469 + j12,320	0,118	-0,977
Falta bifásica-terra	ABT	0,251 + j10,508	1,507 + j10,952	1,256	4,928
	BCT	3,028 + j21,933	3,016 + j22,289	-0,012	-1,561
	CAT	1,351 + j12,455	1,469 + j12,320	0,118	-0,977
Faltas trifásicas	ABC	4,563 + j23,610	4,026 + j23,439	-0,537	-1,114
	ABCT	1,431 + j10,800	1,492 + j11,449	0,061	5,646

Tabela 9 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e DFT na Barra 1.

Cenário de Falta		Impedância Calculada		Desvio de Módulo	
		Solução Proposta (Ω)	ATP (Ω)	Valor Absoluto (Ω)	Percentual (%)
Falta monofásica-terra	AT	2,779 + j17,125	-	-	-
	BT	1,856 + j16,772	-	-	-
	CT	2,397 + j16,922	-	-	-
Falta bifásica	AB	2,474 + j10,949	2,368 + j11,041	-0,106	0,594
	BC	3,137 + j21,485	3,266 + j22,319	0,128	3,740
	CA	1,351 + j12,455	1,347 + j12,359	-0,004	-0,772
Falta bifásica-terra	ABT	0,251 + j10,508	1,459 + j10,953	1,208	4,877
	BCT	3,028 + j21,933	2,847 + j22,270	-0,181	1,382
	CAT	1,351 + j12,455	1,347 + j12,359	-0,004	-0,772
Faltas trifásicas	ABC	4,563 + j23,610	2,883 + j17,617	-1,679	-34,711
	ABCT	1,431 + j10,800	1,072 + j8,600	-0,359	-25,695

Tabela 10 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e FFT Radix2 - 8 na Barra 2.

Cenário de Falta		Impedância Calculada		Desvio de Módulo	
		Solução Proposta (Ω)	ATP (Ω)	Valor Absoluto (Ω)	Percentual (%)
Falta monofásica-terra	AT	7,869 + j29,408	8,292 + j29,310	0,423	0,059
	BT	6,219 + j29,424	6,432 + j29,316	0,214	-0,202
	CT	10,632 + j27,506	11,092 + j27,196	0,460	-0,401
Falta bifásica	AB	6,198 + j21,426	5,516 + j21,656	-0,682	0,194
	BC	1,821 + j11,843	1,704 + j11,728	-0,118	-1,103
	CA	2,690 + j22,260	2,675 + j21,956	-0,016	-1,373
Falta bifásica-terra	ABT	2,639 + j22,637	2,401 + j22,444	-0,238	-0,967
	BCT	1,186 + j11,904	1,104 + j11,867	-0,082	-0,379
	CAT	2,690 + j22,260	2,675 + j21,956	-0,016	-1,373
Faltas trifásicas	ABC	3,241 + j10,041	2,744 + j10,659	-0,497	4,138
	ABCT	2,116 + j22,760	1,700 + j22,650	-0,416	-0,639

Tabela 11 – Desvios numéricos entre a estimação fasorial por mínimos quadrados e DFT na Barra 2.

Cenário de Falta		Impedância Calculada		Desvio de Módulo	
		Solução Proposta (Ω)	ATP (Ω)	Valor Absoluto (Ω)	Percentual (%)
Falta monofásica-terra	AT	2,779 + j17,125	-	-	-
	BT	6,219 + j29,424	-	-	-
	CT	7,869 + j29,408	-	-	-
Falta bifásica	AB	6,198 + j21,426	5,251 + j21,782	-0,947	0,457
	BC	1,821 + j11,843	1,611 + j11,817	-0,210	-0,469
	CA	2,690 + j22,260	2,191 + j22,169	-0,499	-0,651
Falta bifásica-terra	ABT	2,639 + j22,637	2,262 + j22,608	-0,378	-0,305
	BCT	1,186 + j11,904	0,975 + j11,935	-0,211	0,099
	CAT	2,690 + j22,260	2,191 + j22,169	-0,499	-0,651
Faltas trifásicas	ABC	3,241 + j10,041	1,528 + j6,513	-1,713	-57,723
	ABCT	2,116 + j22,760	0,939 + j13,851	-1,177	-64,654

7 Resultados para Ocorrências Reais

Todo o processo de diagnóstico para operações de proteção de distância de linhas de transmissão tem o objetivo de auxiliar as equipes de engenharia de operação de tempo real e de proteção. Para tanto, é necessário garantir que a ferramenta elaborada responda bem a estímulos reais, avaliando-os corretamente. Nesse sentido, uma série de eventos reais de uma transmissora teve a atuação de sua proteção diagnosticada, sendo apresentadas duas dessas ocorrências.

Os dois eventos escolhidos correspondem a situações em que o elemento de proteção responsável pela ação do disjuntor é a atuação da função de distância do IED, eliminando-se quaisquer fatores de variação que possam modificar a resposta do sistema e mascarar o comportamento de interesse. Além disso, ambas as oscilografias escolhidas correspondem a eventos fase-terra distintos e em linhas de transmissão diferentes e equipamentos de proteção variados. Essa escolha busca ilustrar condições distintas, abrangendo diversos níveis de complexidade da rede, desde linhas de transmissão de circuito simples até sistemas duplos com compensação capacitiva série, de forma a ser possível verificar as capacidades de resposta e generalização da solução proposta em eventos desfavoráveis.

Os resultados para cada uma das ocorrências avaliadas são apresentados nas seções 7.1 e 7.2. Primeiro, apresenta-se o caso genérico de linha em circuito simples com proteções do tipo MHO, apresentando o comportamento da abordagem desenvolvida em situação ótima. Em sequência, uma linha de circuito duplo com compensação série capacitiva e unidades de proteção poligonais em ambos terminais é analisada, situação desfavorável à solução desenvolvida, cujos resultados são discutidos.

7.1 Linha de Transmissão em Circuito Simples

O primeiro evento avaliado corresponde a um desligamento automático ocorrido por curto-circuito monofásico envolvendo a fase C, em linha de transmissão de circuito simples de uma transmissora. Ela foi causada por descarga atmosférica na rede, tendo sido eliminada em 60 ms pelas proteções principais e alternadas de distância de zona 2 para faltas fase-terra em ambos terminais da linha.

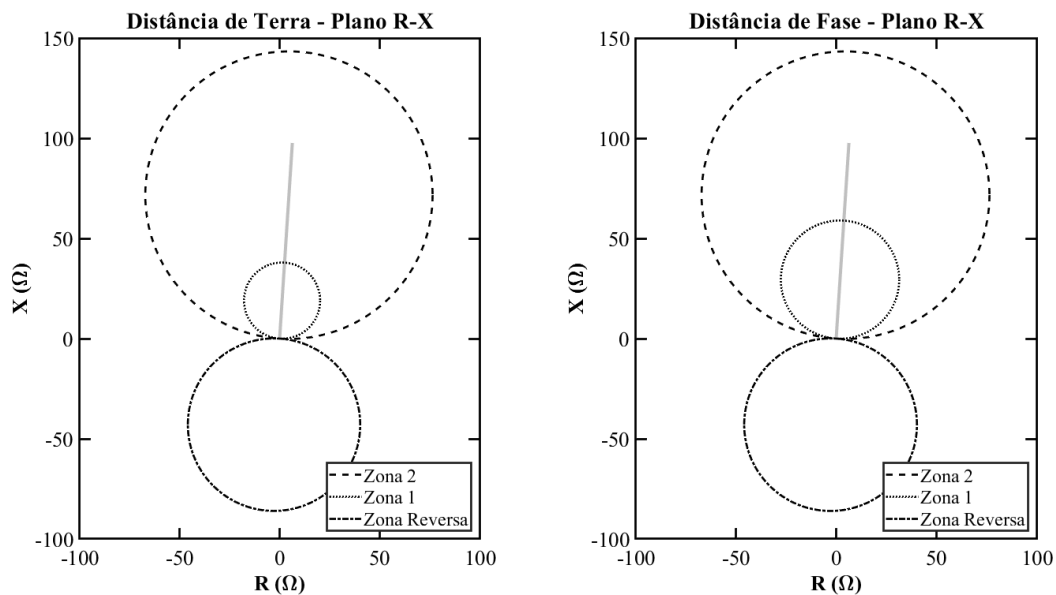
Para essa avaliação, o algoritmo foi configurado com limiares para operação correta e suspeita de 0,8 e 0,6, respectivamente, e com peso da borda de subida de 0,6, para a borda de descida de 0,1 e para o indicador de semelhanças de forma de ondas entre simulação e dados reais de 0,3. No diagnóstico global das operações de distância do IED foi utilizado o fator de ponderação de valor dois, considerado apenas nos sinais analisados -

sinais de operação de zona (*pick-up*), incluso zonas reversas - para totalização da operação da proteção. Apesar disso, também são apresentadas avaliações para sinais não utilizados no cálculo global.

A linha de transmissão utilizada para esse teste apresenta uma tensão nominal de 500 kV em circuito simples cujos parâmetros para as impedâncias de sequência são $Z_0 = 129,9312 + j461,5048 \Omega$ e $Z_1 = 6,3536 + j97,6223 \Omega$ para as componentes zero e positiva, respectivamente, com a de sequência negativa de igual valor à positiva, $Z_2 = Z_1$. Nessa situação, por ser circuito único, o valor para a impedância mútua de sequência zero é nulo, ou seja, $Z_{0m} = 0 \Omega$. Para ambos os terminais dessa linha de transmissão, denominados *Terminal 1* e *Terminal 2*, a função de distância foi configurada com elementos MHO, compondo duas zonas diretas e uma reversa de proteção.

As configurações das proteções de distância dos terminais 1 e 2, apresentadas no [Apêndice A](#), geram visualizações no plano R-X das impedâncias conforme as Figuras 23 e 24, respectivamente. Elas são conectadas por esquema de proteção assistido do tipo POTT2 com 0,015 s de atraso modelado para o canal de comunicação.

Figura 23 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do *Terminal 1* para linha de transmissão de circuito simples.



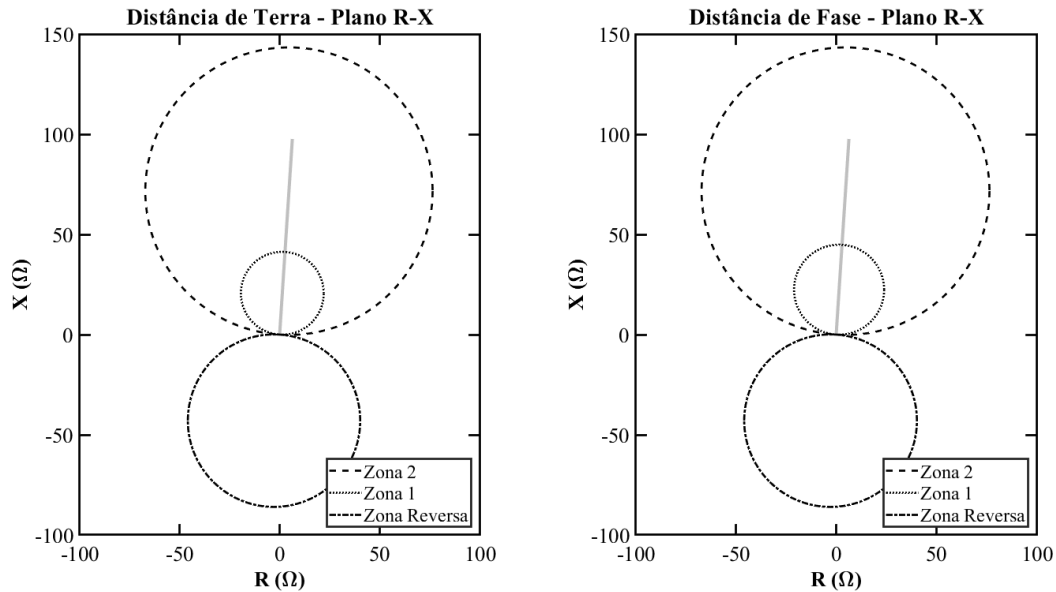
(a) Distância de Terra - IED no *Terminal 1* - linha de circuito simples.

(b) Distância de Fase - IED no *Terminal 1* - linha de circuito simples.

Fonte: o autor

Em ambos IEDs, além da lógica sequencial tradicional da proteção de distância, utilizou-se uma lógica de *trip* baseada na detecção de qualquer *pick-up* de zona 2, seja ele de fase ou de terra. Nessas configurações, os resultados de campo e de diagnóstico são apresentados nas Figuras 25 e 26. Nelas, as regiões cinzas indicam o intervalo de tolerância configurado, de $\pm 10,0$ ms, com os fatores multiplicativos de erros propagados já aplicados.

Figura 24 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do *Terminal 2* para linha de transmissão de circuito simples.



(a) Distância de Terra - IED no *Terminal 2* - linha de circuito simples.

(b) Distância de Fase - IED no *Terminal 2* - linha de circuito simples.

Fonte: o autor

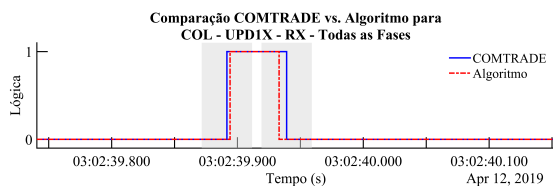
Os resultados de ambos IEDs da linha de transmissão são muito semelhantes e apresentam diversos pontos comuns. Assim, tanto no recebimento de sinal permissivo de POTT2 (Figura 25a e Figura 26a) quanto no *trip* (Figura 25g e Figura 25g), o erro (região cinza no entorno das bordas do sinal) estende-se por uma maior faixa que nos demais cenários, comportamento associado ao erro propagado de cada processo.

Para o sinal RX , tem-se dois processos fontes de erros, a comunicação do sinal permissivo e o processo de *pick-up* de zona 2, de forma que (5.2) pode ser convertida em $\delta_{erro} = 2\delta_{erro\ usuário}$, explicando o maior sombreamento de erro. De maneira semelhante, tem-se o sinal de *trip*, atrelado à ativação da função de distância e ao canal de transmissão do esquema assistido, resultando em dois processos com erros e na maior área marcada.

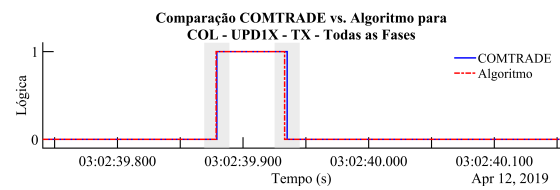
Entretanto, esse comportamento de erro dilatado não é verificado nos pontos de emissão de sinais permissíveis, TX , nas Figuras 25b e 26b. Isso se deve ao fato de que esse processo é diretamente decorrente de ativação de zona 2 do sistema, de forma que não existem processos adicionais de erro no caminho da marcação, em especial se se considerarem as comunicações como parte de RX , como foi feito na abordagem proposta.

Apesar desses comportamentos de erros para esses sinais, é possível verificar que, para recebimento e envio de sinal no esquema POTT2, tanto a borda de subida quanto a de descida estão contidas dentro do intervalo de tolerância definido, de forma que são interpretadas como formas de onda equivalentes para simulação e campo. Para o comando de *trip*, no entanto, a borda de descida do sinal não respeita os limiares de tolerância

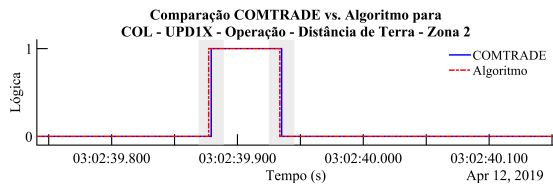
Figura 25 – Comparativo de sinais operativos simulados *vs.* reais para o *Terminal 1* da linha de transmissão de circuito simples.



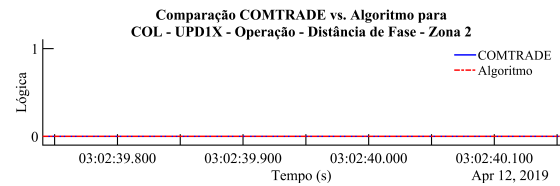
(a) Recebimento de sinal permissivo de POTT2.



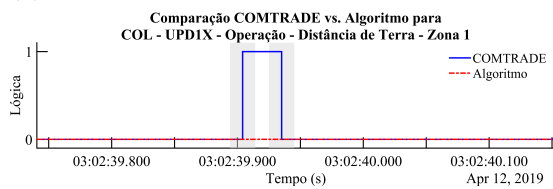
(b) Envio de sinal permissivo de POTT2.



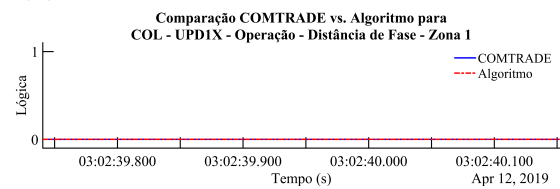
(c) Ativação de zona 2 de distância de terra.



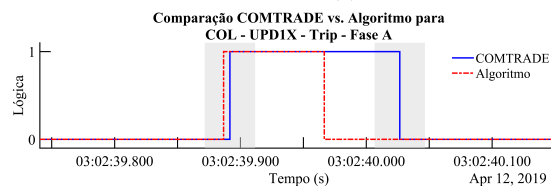
(d) Ativação de zona 2 de distância de fase.



(e) Ativação de zona 1 de distância de terra.



(f) Ativação de zona 1 de distância de fase.



(g) Comando de *trip* para fase A.

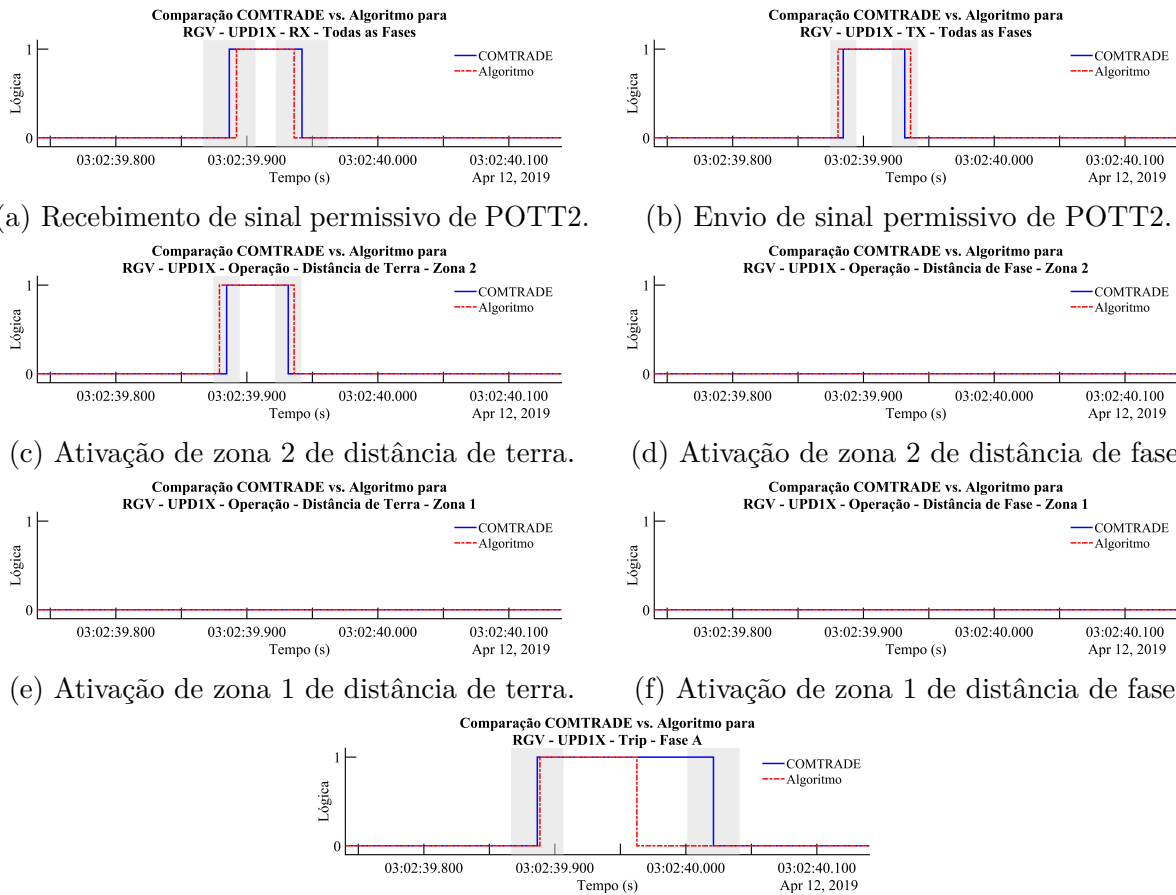
Fonte: o autor

definido, o que será refletido no *assessment score* final da função. Essa característica, em grande parte, está associada ao momento de detecção de abertura dos disjuntores associados, em que a simulação encerra a geração do sinal, enquanto ele é mantido por maior tempo nos equipamentos de campo. Contudo, esse comportamento deve pouco influenciar o diagnóstico final da operação, pelo menor peso utilizado na descida do sinal, em especial se considerado o respeito à tolerância na borda de subida.

Essa característica do sistema desenvolvido de interromper a avaliação das formas de onda de ativação e desativação de funções de distância a partir da geração do comando *trip* é visível também na [Figura 25e](#). Nessa situação, é detectada uma ativação de distância de terra de zona 1 nos dados de campo, não correspondida nas simulações justamente pela borda de subida do sinal em tempo superior ao de *trip*.

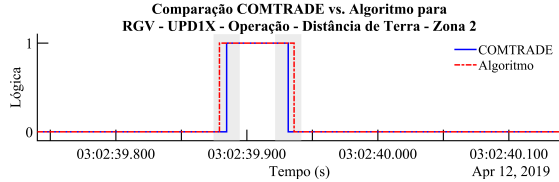
Como a configuração do sistema é de emissão de comando de abertura para os disjuntores no caso de ativação de zona 2 fase ou de terra, esses são os sinais de maior interesse para diagnóstico. Neles, as proteções nos terminais 1 e 2 atendem aos critérios de

Figura 26 – Comparativo de sinais operativos simulados *vs.* reais para o *Terminal 2* da linha de transmissão de circuito simples.

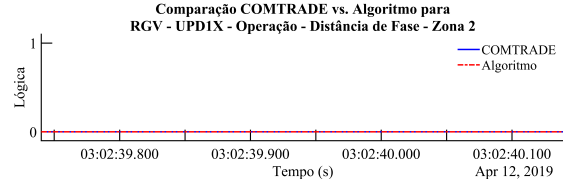


(a) Recebimento de sinal permissivo de POTT2.

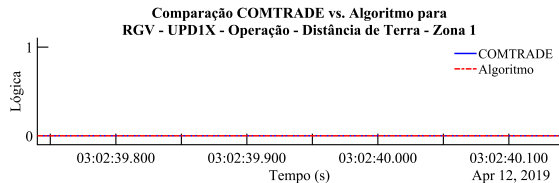
(b) Envio de sinal permissivo de POTT2.



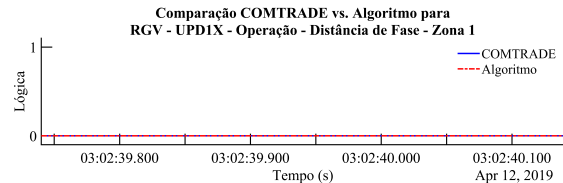
(c) Ativação de zona 2 de distância de terra.



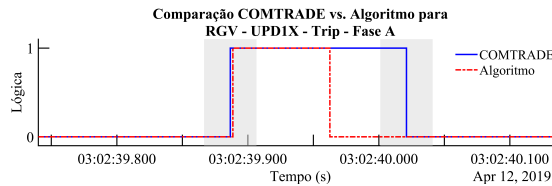
(d) Ativação de zona 2 de distância de fase.



(e) Ativação de zona 1 de distância de terra.



(f) Ativação de zona 1 de distância de fase.



(g) Comando de *trip* para fase A.

Fonte: o autor

tolerância propostos, de forma que é automaticamente considerada a igualdade de sinais e um diagnóstico de atuação correta é gerado.

Para esse cenário, pela configuração de esquema POTT2 e *trip* de zona 2 definidos, é verificado que imediatamente após a borda de subida dessa ativação, com desvio temporal pequeno, os sinais *TX* e *trip* são habilitados, indicando que a rede de Petri desenvolvida foi capaz de corretamente realizar o fluxo de marcações no sistema e representar o comportamento dinâmico das proteções, indicando a validade da abordagem e modelo desenvolvidos. Essa validade, inclusive, é mais evidente se for avaliado o comportamento global da proteção, considerando os *assessment scores* calculados, conforme Tabela 12 e Tabela 13, em que são apresentados apenas os sinais escolhidos para a avaliação global do dispositivo.

Nessas tabelas, fica evidente que o casamento das bordas de subida e descida dos sinais de campo e simulados geram valores elevados de *assessment score*, com coeficientes próximos à unidade, superando o critério mínimo para definição da operação como correta,

Tabela 12 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no *Terminal 1* na linha de transmissão de circuito simples.

Sinal	Condição	<i>Similarity Score</i>	<i>Displacement Score</i>	<i>Assessment Score</i>	Avaliação Final
Distância de Terra de Zona 1	Ativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
	Desativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
Distância de Fase de Zona 1	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona 2	Ativação	0,99	0,93	0,95	Correta
	Desativação	0,99	0,94	0,95	Correta
Distância de Fase de Zona 2	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona Reversa	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Fase de Zona Reversa	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Diagnóstico Global				0,96	Correto

reproduzindo os comportamentos verificados e deduzidos das formas de onda.

É o conjunto de comportamentos gráficos combinados com os valores de coeficientes calculados que permite classificar as operações das proteções de distância de ambos terminais como corretas. Contudo, o cenário apresentado aqui é ótimo, com muita concordância entre os valores calculados e obtidos de campo. Assim, ainda é necessário avaliar condições em que há divergências entre as formas de onda e as tolerâncias não são respeitadas, forçando o uso da hierarquização de priorização de igualdade dos sinais apresentada. Esse cenário é tratado na [seção 7.2](#).

7.2 Linha de Transmissão em Circuito Duplo

O segundo evento utilizado para demonstração de resultados corresponde a um desligamento provocado por curto-circuito monofásico fase-terra envolvendo a fase A, em Dezembro de 2018, eliminado em 66,3 ms pela atuação de primeira zona das proteções principais e alternadas de distância de terra em ambos terminais da linha. Conforme registro com os órgãos reguladores, o evento foi provocado por excremento de aves da espécie *Theristicus caudatus*, popularmente conhecida como *Curicaca*, no sistema de transmissão.

O diagnóstico das operações de proteção de distância foi realizado com critérios idênticos aos definidos para o evento em linha de circuito simples apresentado na [seção 7.1](#), inclusive com os mesmos sinais escolhidos para avaliação global dos IEDs. Novamente,

Tabela 13 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no *Terminal 2* na linha de transmissão de circuito simples.

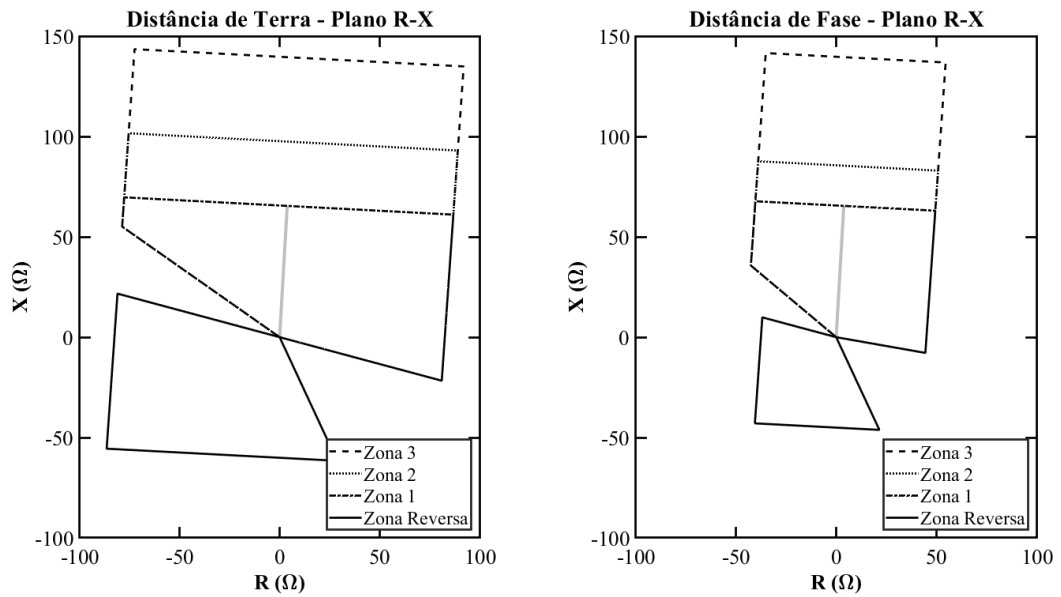
Sinal	Condição	<i>Similarity Score</i>	<i>Displacement Score</i>	<i>Assessment Score</i>	Avaliação Final
Distância de Terra de Zona 1	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Fase de Zona 1	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona 2	Ativação	0,91	0,79	0,83	Correta
	Desativação	0,91	0,82	0,83	Correta
Distância de Fase de Zona 2	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona Reversa	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Fase de Zona Reversa	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Diagnóstico Global				0,99	Correto

foram utilizadas formas de onda correspondentes às operações de ativação, desativação e *pick-up* das zonas de proteções de cada terminal da linha de transmissão, sempre com peso dois, mesmo para zonas reversas.

Nessa situação, a linha de transmissão de circuito duplo cuja proteção foi avaliada conta com tensão nominal de 500 kV e parâmetros de sequências zero e positiva com valores, respectivamente, $Z_0 = 90,57 + j264,29 \Omega$ e $Z_1 = 3,8 + j65,4 \Omega$, com a impedância de sequência negativa igual à de sequência positiva, $Z_2 = Z_1$. Por se tratar de um sistema em circuito duplo, a impedância mútua de sequência zero não é nula, tendo sido especificada com o valor $Z_{0m} = 98,83 + j148,40 \Omega$. Nas condições da ocorrência, o *Terminal 1* e o *Terminal 2* estavam com proteções de distância configuradas em zonas poligonais de cinco lados, em número de três diretas e uma reversa. Esse sistema de transmissão contava também com compensação capacitiva série cujo valor de impedância foi determinado em $-j31,25 \Omega$ por fase.

Os terminais 1 e 2 dessa linha de transmissão foram configurados para gerar a visualização no diagrama de impedâncias das Figuras 27 e 28, respectivamente, conforme dados apresentados no Apêndice A para o modelo de dispositivo D60 (GE Grid Solutions, 2018). Os IEDs desses terminais foram conectados entre si por esquema de proteção assistido de tipo POTT2, com o canal tratado como um atraso de tempo de 25 ms. Em ambos, a lógica sequencial tradicional da proteção de distância foi mantida, definindo a emissão de comando de *trip* apenas em ativações de fase ou terra de primeira zona.

Figura 27 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do *Terminal 1* para linha de transmissão de circuito duplo.

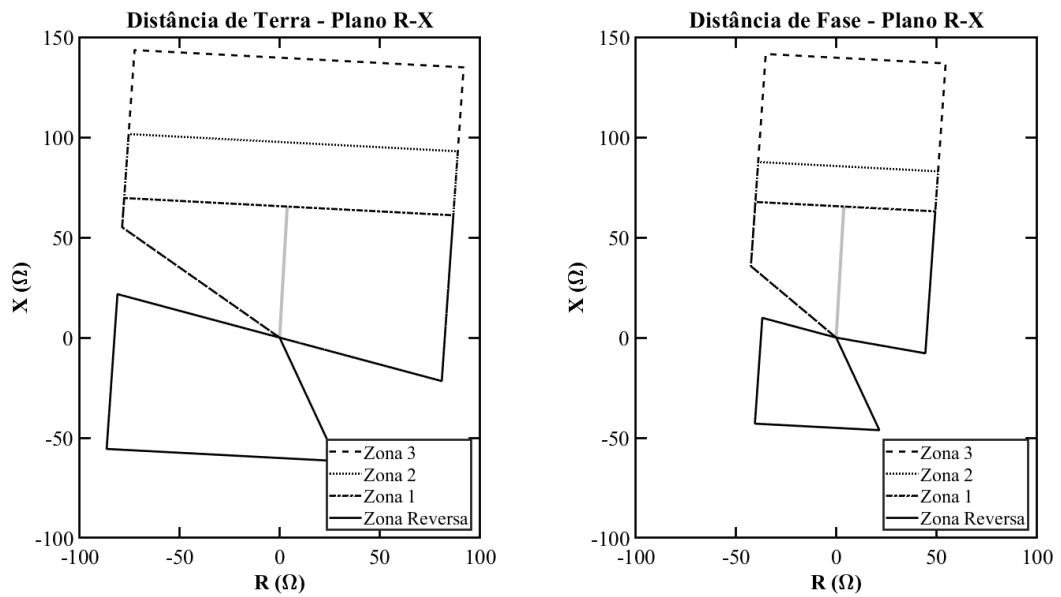


(a) Distância de Terra - IED no *Terminal 1* - linha de circuito duplo.

(b) Distância de Fase - IED no *Terminal 1* - linha de circuito duplo.

Fonte: o autor

Figura 28 – Diagrama de impedâncias da proteção de distância do *Terminal 2* para linha de transmissão de circuito duplo.



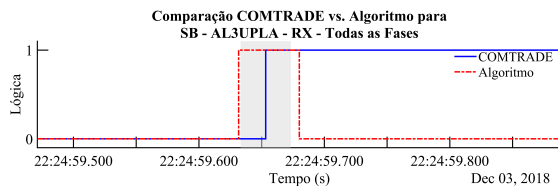
(a) Distância de Terra - IED no *Terminal 2* - linha de circuito duplo.

(b) Distância de Fase - IED no *Terminal 2* - linha de circuito duplo.

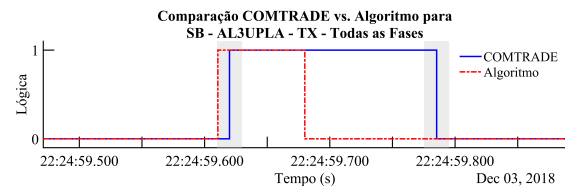
Fonte: o autor

Com essas configurações para os IEDs, os resultados do diagnóstico das operações de campo gerados pela rotina desenvolvida são apresentados nas Figuras 29 e 30. Nelas, as regiões em cinza correspondem ao intervalo de tolerância configurado, de $\pm 10,0$ ms, já aplicado o fator multiplicativo de erro quando necessário.

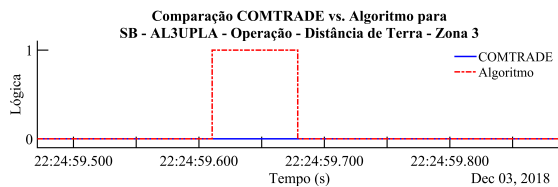
Figura 29 – Comparativo de sinais operativos simulados *vs.* reais para o *Terminal 1* da linha de transmissão de circuito duplo.



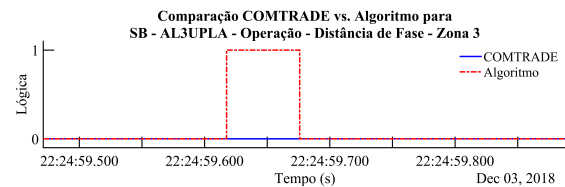
(a) Recebimento de sinal permissivo de POTT2.



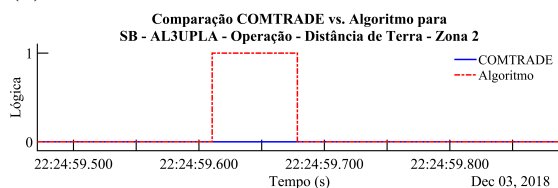
(b) Envio de sinal permissivo de POTT2.



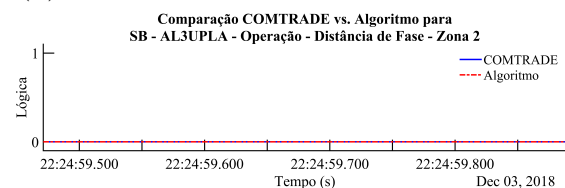
(c) Ativação de zona 3 de distância de terra.



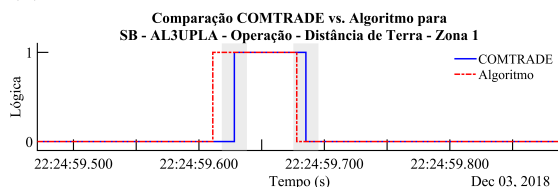
(d) Ativação de zona 3 de distância de fase.



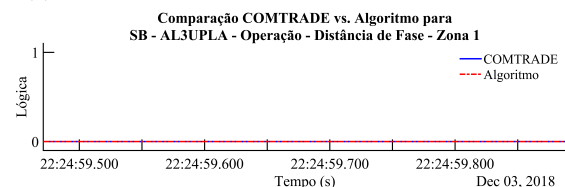
(e) Ativação de zona 2 de distância de terra.



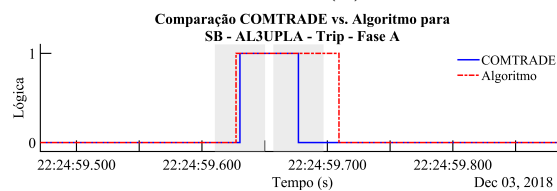
(f) Ativação de zona 2 de distância de fase.



(g) Ativação de zona 1 de distância de terra.



(h) Ativação de zona 1 de distância de fase.

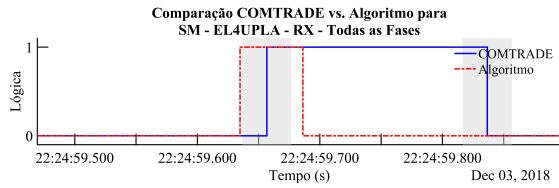


(i) Comando de *trip* para fase A.

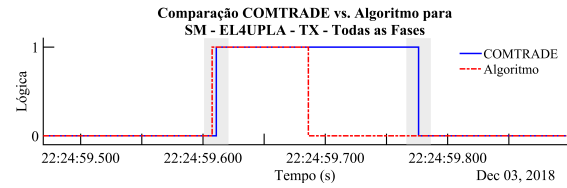
Fonte: o autor

De modo geral, os resultados para essas simulações apresentam grandes desvios entre as curvas de campo e as simuladas, sobretudo se comparados com os resultados obtidos na linha de transmissão de circuito simples. Contudo, múltiplos comportamentos relevantes do sistema, bem como algumas de suas limitações, podem ser extraídos das formas de onda apresentadas.

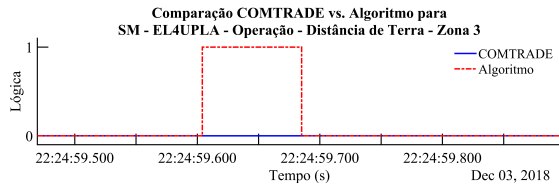
Figura 30 – Comparativo de sinais operativos simulados *vs.* reais para o *Terminal 2* da linha de transmissão de circuito duplo.



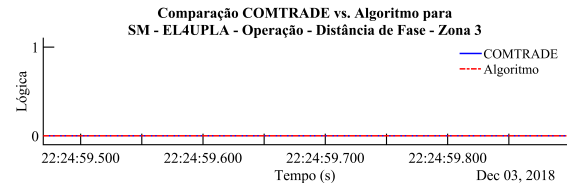
(a) Recebimento de sinal permissivo de POTT2.



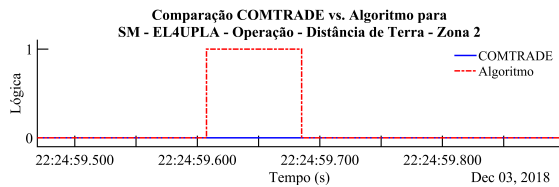
(b) Envio de sinal permissivo de POTT2.



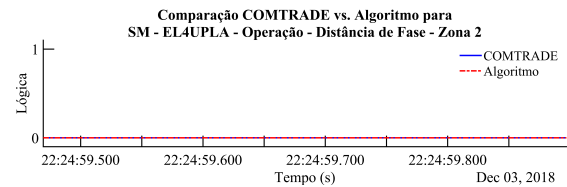
(c) Ativação de zona 3 de distância de terra.



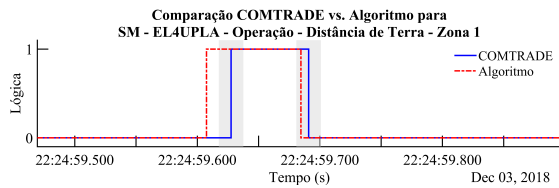
(d) Ativação de zona 3 de distância de fase.



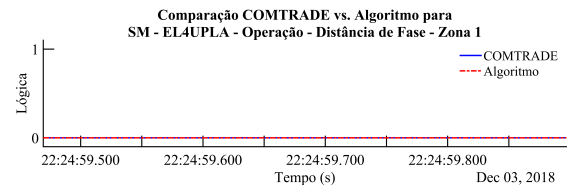
(e) Ativação de zona 2 de distância de terra.



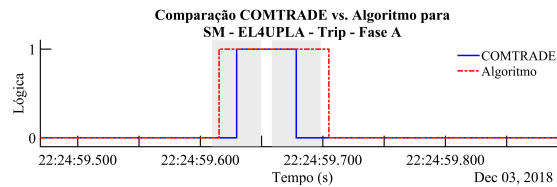
(f) Ativação de zona 2 de distância de fase.



(g) Ativação de zona 1 de distância de terra.



(h) Ativação de zona 1 de distância de fase.



(i) Comando de *trip* para fase A.

Fonte: o autor

O primeiro comportamento a ser destacado são os erros associados aos sinais avaliados. De maneira semelhante aos resultados verificados para a linha de transmissão de circuito simples, o recebimento de sinal permissivo do tipo POTT2 (apresentado na Figura 29 e na Figura 30) e o comando de *trip* (na Figura 29i e na Figura 29i) contam com o erro (região cinza nas bordas do sinal) expandido por maior faixa que as demais formas de onda analisadas.

Como no caso anterior, esse comportamento decorre do erro propagado de cada processo. Assim, ao sinal *RX* tem-se dois processos com erros associados, um do erro do canal de comunicação e outro do *pick-up* de zona 1, resultando igualmente na equação de erro $\delta_{erro} = 2\delta_{erro\ usuário}$, explicando o espaço das tolerâncias, o dobro da configuração de 10 ms. De forma semelhante, o sinal de *trip* também está associado a dois processos, à ativação da função de distância e ao canal de transmissão, caso haja recebimento de sinal de esquema assistido, o que permite compreender o maior limiar apresentado na Figura 29i e na Figura 29i.

Os sinais correspondentes à emissão de comandos de teleproteção assistida, especificamente o *TX* (das Figuras 29b e 30b), não contam com a dilatação temporal de sua margem de erro, pelas mesmas razões especificadas para a linha de transmissão em circuito simples apresentada na seção 7.1.

Nesses cenários, mesmo considerando os erros propagados, percebe-se que o recebimento de sinal POTT2 não tem a borda de subida nem a de descida contidas nas tolerâncias definidas, em ambas as situações. Assim, não é possível definir essa forma de onda como representativa de uma operação correta, sendo necessário o cálculo do *assessment score* para esse sinal. Apesar disso, esse comportamento é simples de ser explicado, estando associado ao tempo estimado (e configurado) para os processos de comunicação, que podem não corresponder bem à realidade observável.

De modo distinto, verifica-se que a borda de subida do sinal de *trip* respeita o limiar configurado, em ambas proteções da linha de transmissão, apesar de a borda de descida não estar contida em faixas aceitáveis de desvio. Esse comportamento pode ser determinado pela diferença no tempo de manutenção do sinal entre o dispositivo em campo e o modelo. No modelo, um comando de *trip* é encerrado quando a magnitude da estimativa fasorial das correntes é inferior a 10 % de seu valor em estado permanente (normal) somada a um atraso de tempo configurável, o que não é necessariamente o caso para o equipamento real, em que esse sinal é mantido mesmo após as correntes das fases atingirem valores considerados nulos. Nesse cenário, pode-se determinar a operação da borda de subida de *trip* como correta, não sendo o mesmo necessário para a situação de descida, que deve ser avaliada conforme seu *assessment score*, a ser apresentado.

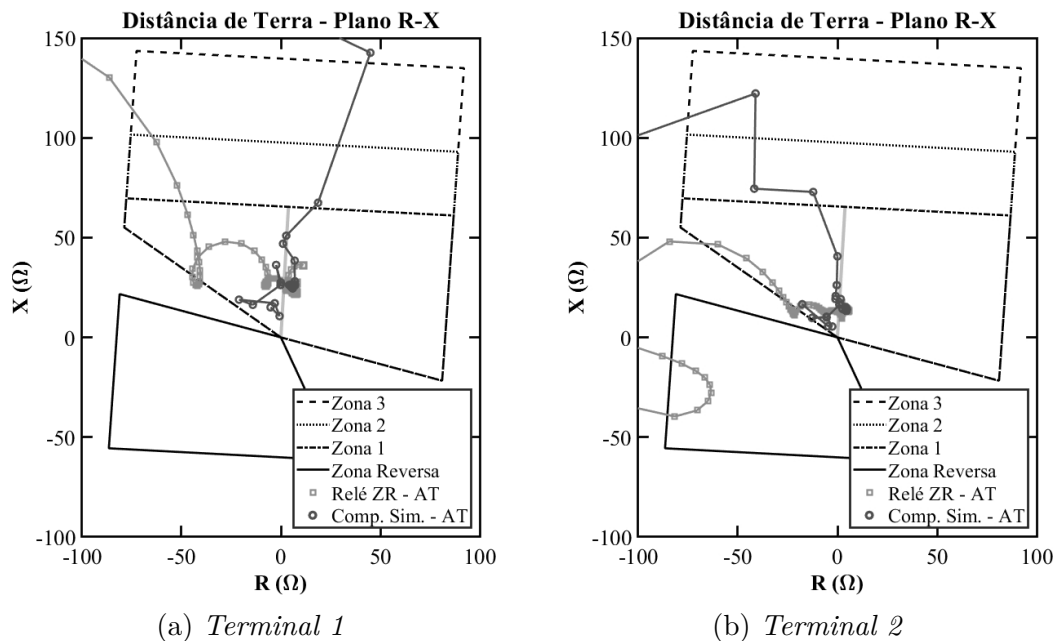
Os comportamentos tanto de *trip* quanto de *RX* são idênticos em ambos terminais da linha de transmissão, de forma a terem explicações comuns, conforme apresentado.

Entretanto, isso não ocorre com todos os sinais operativos das funções de proteção de distância, em especial para os associados a comandos de *pick-up* de diferentes zonas. Para o *Terminal 1*, verificam-se sinais bem distintos entre simulação e campo para as zonas 2 e 3 (nas Figuras 29c, 29d, 29e e 29f), tanto de distância de fase quanto de terra.

No modelo desenvolvido, esse comportamento é explicado com observações ao *pick-up* de zona 1, na Figura 29g. Como apresentado na seção 4.3, os modelos de IED construídos pela rotina desenvolvida seguem a lógica sequencial de ativação das zonas, em que a zona prévia, de número maior, já deve estar habilitada para que a zona corrente possa ser executada. Assim, uma ativação de zona 1 exige que as zonas 2 e 3 tenham sido previamente avaliadas e apontado faltas na rede. Esse comportamento não é necessário ao dispositivo em campo, que pode avaliar as zonas individualmente, sem que o critério de execuções sequenciais de zonas seja imposto, explicando o desvio entre simulação e dados reais.

Mais ainda, a forma como os dispositivos estimam a impedância varia, como verificado em Figura 31a. Nessa figura, a simulação (sinal *Relé ZR*) e o equipamento em campo (cuja impedância foi calculada a partir das estimações fasoriais executadas pelo dispositivo, *Comp. Sim.*) tendem a um valor comum na primeira zona de terra, mas diferem bastante no trajeto percorrido, sensibilizando as zonas configuradas de maneiras distintas e resultando nas diferenças observadas entre as formas de onda de diagnóstico e as de campo.

Figura 31 – Impedância AT estimada para a falta em linha de transmissão em circuito duplo.



Fonte: o autor

Conforme configuração de zonas definida pelo usuário e a sequência lógica de operação das funções de proteção definida pelo algoritmo do sistema elaborado, verifica-se que a zona 3 engloba as zonas 1 e 2, enquanto a zona 2 contém a 1. Esse comportamento faz com que uma impedância de zona de terra 1 no sistema, por ser englobada pelas demais, provoque a ativação também das zonas 2 e 3, resultando em sinais de atuação das Figuras 29c, 29e e 29g de comprimentos iguais, apontando para uma resposta comum ao sistema, decorrente do pertencimento das funções de zonas de menores números às de maiores valores. Essa característica é distinta daquela verificada para o equipamento em campo, que exclui as ativações de zonas 2 e zonas 3 quando da detecção de lógica ativa na zona 1 de terra ou fase (GE Grid Solutions, 2018).

Nesse sentido, a resposta produzida pelo algoritmo não está incorreta, mas indica uma limitação do modelo proposto para essa lógica de operação de relés e IEDs. Esse é um resultado decorrente da necessidade de generalização para o modelo desenvolvido, que deve representar o maior número possível de equipamentos e que, por isso, não inclui particularidades associadas a modelos de equipamentos de proteção, não considerando esses detalhes nos modelos implementados.

Para o IED no *Terminal 1* da linha de transmissão, verifica-se ainda uma detecção de atividade de zona 1 de fase na simulação não acompanhada pela forma de onda em campo. Essas variações estão associadas às rotinas implementadas de estimação fasorial, distintas entre as fontes de dados diversas, e não devem acarretar em modificações na resposta final do diagnóstico, conforme discutido para a Figura 31a.

Comportamentos muito semelhantes são verificados também para o IED no *Terminal 2* da linha de transmissão, ilustrado na Figura 30. Desse modo, as explicações e observações apresentadas para o *Terminal 1* são também válidas nessa situação. As principais diferenças estão associadas ao não respeito do intervalo de tolerância para a borda de subida do sinal de operação de distância de terra de zona 1 e a inexistência de ativações para qualquer zona de fase, características decorrentes das variações naturais das rotinas numéricas de estimação de impedância, de acordo com a Figura 31b.

Por fim, então, cabe apresentar os *assessment scores* calculados para essas formas de onda, bem como as classificações de diagnóstico individuais e globais para cada uma, o que é feito na Tabela 14 e na Tabela 15 para os terminais 1 e 2 da linha de transmissão, respectivamente. Nesse cenário, assim como para o circuito simples, são apresentados os valores das operações de zonas da proteção, que foram configuradas para utilização na determinação da resposta global do sistema. Além dessas informações, são apresentados também os coeficientes calculados para o envio (TX) e recebimento (RX) dos sinais de teleproteção, por ilustrarem comportamentos específicos do sistema.

O primeiro resultado relevante a ser observado nas tabelas dos *assessment scores* de diagnóstico está associado a operação global dos dispositivos de proteção de cada

Tabela 14 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no *Terminal 1* na linha de transmissão de circuito duplo.

Sinal	Condição	<i>Similarity Score</i>	<i>Displacement Score</i>	<i>Assessment Score</i>	Avaliação Final
Distância de Terra de Zona 1	Ativação	0,92	0,45	0,62	Suspeita
	Desativação	0,92	0,74	0,62	Correta
Distância de Fase de Zona 1	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona 2	Ativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
	Desativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
Distância de Fase de Zona 2	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona 3	Ativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
	Desativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
Distância de Fase de Zona 3	Ativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
	Desativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
Recebimento POTT2 (RX)	Ativação	0,45	0,35	0,35	Incorreta
	Desativação	0,45	0,00	0,35	Incorreta
Envio POTT2 (TX)	Ativação	0,65	0,68	0,60	Correta
	Desativação	0,65	0,00	0,60	Incorreta
Diagnóstico Global				0,68	Suspeita

terminal da linha de transmissão. Para o *Terminal 1*, a resposta é considerada suspeita, indicando que as informações alimentadas ao algoritmo não são suficientes para elaboração de conclusão ou apresentam inconsistências mais severas no diagnóstico, que impedem o sistema de chegar a resultado conclusivo. Em contrapartida, o *Terminal 2* tem seu comportamento global definido como correto.

Nessa análise, a diferença dos valores calculados em cada terminal é parcialmente explicada pelas ativações das zonas 2 e 3 de proteção de terra na simulação, que não correspondem aos resultados de campo de ambos os terminais. Esse comportamento se explica pelas divergências entre o equipamento real e o modelo de IED, anteriormente apresentadas, que afetam os coeficientes calculados para os sinais avaliados no diagnóstico. Esse fato, então, penaliza consideravelmente os *assessment scores* das proteções, principalmente para o *Terminal 1*, que conta ainda com detecção de ativação de zona de fase, em função da diferente abordagem utilizada para estimação de impedância em relação ao equipamento de campo.

Esse conjunto de fatores ainda é complementado no *Terminal 1* pela diferença temporal entre as bordas de subida da zona 1 de terra, que impede estabelecimento de diagnóstico correto para o sinal e provoca a necessidade de cálculo do fator de deslocamento,

Tabela 15 – Coeficientes calculados para o diagnóstico no *Terminal 2* na linha de transmissão de circuito duplo.

Sinal	Condição	<i>Similarity Score</i>	<i>Displacement Score</i>	<i>Assessment Score</i>	Avaliação Final
Distância de Terra de Zona 1	Ativação	0,91	0,39	0,59	Incorreta
	Desativação	0,91	0,78	0,59	Correta
Distância de Fase de Zona 1	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona 2	Ativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
	Desativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
Distância de Fase de Zona 2	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Distância de Terra de Zona 3	Ativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
	Desativação	0,00	0,00	0,00	Incorreta
Distância de Fase de Zona 3	Ativação	1,00	1,00	1,00	Correta
	Desativação	1,00	1,00	1,00	Correta
Recebimento POTT2 (RX)	Ativação	0,53	0,35	0,37	Incorreta
	Desativação	0,53	0,00	0,37	Incorreta
Envio POTT2 (TX)	Ativação	0,69	0,88	0,74	Correta
	Desativação	0,69	0,00	0,74	Suspeita
Diagnóstico Global				0,84	Correto

que tem efeito penalizador nos valores finais de resposta. Dessa forma, são quatro os processos com divergências entre as simulações e os dados de campo, número suficientemente elevado de diferenças que provoca decréscimo considerável no *assessment score* final, resultando em diagnóstico de operação suspeita.

A caracterização como suspeita da proteção indica a existência de comportamentos ilógicos no sinal, como por exemplo a ativação de zona 1 de terra sem as correspondências na zona 2 e 3, que requerem a análise mais completa por parte da equipe de engenharia para que possam ser determinadas causas para o fenômeno. Para essa situação específica, sabe-se que isso deriva das diferenças comportamentais entre o equipamento e seu modelo, que não puderam ser incluídas na solução em função da necessidade de generalidade dessa descrição, essencial para garantir sua aplicabilidade a diferentes IEDs.

Em contrapartida e apesar de também contar com ativações não correspondidas de zona 2 e 3 de terra, os resultados e formas de onda associadas ao *Terminal 2* não apresentam comportamentos inesperados nos padrões de ativação de zonas de fase. Por isso, tem-se a confusão do algoritmo reduzida, de forma que o *assessment score* tenha penalização menor, permitindo a classificação do diagnóstico como correta, em que se entende que os comportamentos espúrios das zona 2 e 3 não são relevantes à resposta final,

em especial por não haver ativação de nenhuma zona de fase.

Apesar das classificações globais da proteção, a [Tabela 14](#) e a [Tabela 15](#) ainda contam com valores internos para sinais específicos classificados como incorretos ou suspeitos. Nessas situações, as diferenças entre a simulação e os dados de campo foram suficientes para indicar comportamento anormal/inesperado daquela função de proteção, mesmo considerada a tolerância estabelecida pelo usuário. Com isso, possíveis pontos de falha são apontados, que precisam ser investigados pelas equipes de pós-operação. Esse comportamento, contudo, deve ser utilizado apenas em conjunto com o resultado global do diagnóstico como possível ponto de atenção e estudo, e não avaliado de forma separada e individual das demais informações geradas no algoritmo desenvolvido.

Considerando então todas as particularidade da solução proposta e suas limitações, é adequado afirmar que a proteção de distância dessa linha de transmissão de circuito duplo foi corretamente diagnosticada, sendo especificados pontos inconclusivos, funções com atuação inadequada e onde (sinais, bordas de subida e descida) esses comportamentos foram verificados. Juntamente com os dados de diagnóstico da linha de circuito simples, verifica-se capacidade de representação adequada para as características dinâmicas das proteções nos modelos utilizando CTPN, complementado a avaliação proposta no [Capítulo 6](#).

Além disso, a solução se mostrou robusta o suficiente para adequadamente diagnosticar diferentes modelos de IEDs de diferentes fabricantes, atestando capacidade de representação de diversos equipamentos, mesmo para dispositivos com grandes diferenças funcionais em relação aos modelos implementados, e demonstrando sua capacidade de generalização. Portanto, nessas condições, considera-se que a solução proposta foi adequada para avaliar fenômenos reais registrados por diferentes equipamentos, atendendo aos objetivos propostos neste trabalho.

8 Conclusão e Propostas de Continuidade

Esse trabalho teve, como objetivo principal, a construção de ferramenta computacional capaz de realizar diagnóstico das operações de proteção de distância de linhas em transmissão na ocorrência de um curto-circuito. O sistema desenvolvido deveria ser capaz de avaliar diferentes modelos de dispositivos e fabricantes (generalizável), permitir a configuração de múltiplos esquemas de operação e descrição de diferentes formas e características de zona de proteção (parametrizável) e independente, capaz de aplicação a ferramentas mais complexas ou execução individual. Por fim, desejava-se que o *software* elaborado conseguisse diagnosticar o comportamento de IEDs a partir de oscilografias reais provenientes de campo (no formato COMTRADE), permitindo seu uso por concessionárias de energia elétrica.

Para tanto, foi utilizada uma abordagem *model-based* com raciocínios de *consistência* para realização das operações de diagnóstico. Nessa técnica, um modelo de referência do comportamento de interesse é construído e simulado com informações extraídas de campo, cujos resultados são comparados com as operações reais observadas em busca de incongruências entre os sinais produzidos em cada situação. Assim, foi necessário construir um modelo de proteção de distância e técnicas de comparação de curvas para o diagnóstico.

O modelo de relé com função de distância foi elaborado utilizando estimação fasorial por mínimos quadrados, que garante a filtragem de harmônicos de ordens superiores e componentes contínuas, reduzindo os ruídos e melhor avaliando as frequências fundamentais do sistema. Com isso, garante-se capacidade de operação para diferentes características de entrada, habilitando capacidades de generalização para diversas faltas. Essa funcionalidade teve sua implementação validada através de simulações comparativas com os resultados gerados por modelos de relés disponíveis no ATP.

Além disso, a avaliação da lógica de operação dessas proteções é realizada por funções paramétricas, em uma abordagem geométrica. Dessa forma, habilita-se a representação de figuras gráficas complexas para as zonas de proteção, compostas de múltiplos blocos base cujas interseções no plano cartesiano determinam áreas de operação da proteção. Esse comportamento visa garantir capacidade de generalização para as configurações de zonas de proteção, visto que não está atrelada a nenhuma parametrização definida por fabricantes de relé nem a geometrias fixas, habilitando a representação de formas geométricas ilimitadas, desde que construídas com os blocos fundamentais fornecidos.

Por fim, para representação das dinâmicas de relés e IEDs foram utilizadas redes de Petri temporais coloridas. Elas permitem desacoplar as lógicas de comportamento da proteção dos algoritmos numéricos de relés (ROMEIS; BILLER; JAEGER, 2014),

garantindo fácil modificação dos modelos construídos para melhor representação dos equipamentos de interesse, caso necessário. As CTPNs são capazes também de forçar a execução das rotinas de proteção de forma sequencial, garantindo que a ordenação especificada para as operações seja sempre avaliada em sucessão, permitindo detecção de comportamentos fora de sequência e alertando o usuário. Adicionalmente, essa ferramenta se mostra flexível o suficiente para permitir a representação de outras funcionalidades do relé, como bloqueio, esquemas de telecomunicação, configurações não convencionais de *trip*, entre outros. Esse conjunto de características e funcionalidades garante que as redes de Petri desenvolvidas possam representar os mais diferentes tipos de proteção possíveis, contribuindo para a generalidade da solução.

É importante destacar também que as CTPN permitem soluções matriciais e simulações simultâneas de processos concorrentes e distribuídos. Isso permite que se avaliem as proteções em ambos terminais da linha de transmissão de maneira síncrona, reduzindo o custo computacional do *software* desenvolvido e seu tempo de processamento, além de habilitar a representação de esquemas de *trip* assistidos.

Também foi necessário desenvolver técnicas para a comparação de sinais na abordagem *model-based*. Para tanto, foram utilizadas múltiplas abordagens, desde a comparação das diferenças absolutas das bordas de subida e descida das formas de onda com tolerâncias definidas até a utilização de correlação cruzada. O conjunto desses métodos gera valores numéricos únicos para cada sinal de proteção, que podem ser avaliados para diagnosticar globalmente um IED. Nessa metodologia, as informações calculadas são utilizadas para avaliar comportamentos por aproximações, garantindo robustez e capacidade para diagnóstico mesmo em situações com incerteza em parâmetros de relés ou divergências entre modelo e equipamento de campo.

Todos esses processos permitiram o desenvolvimento da ferramenta de diagnóstico de operações da proteção de distância, que foi testada pela análise de oscilografias de dois eventos reais. Eles representam ocorrências em linhas de transmissão muito distintas, com modelos de equipamentos muito diferentes e com resultado de grande concordância e discordância entre os sinais simulados e reais, para os quais o *software* elaborado respondeu bem e diagnosticou corretamente o evento. Isso atesta a robustez da solução proposta e sua habilidade de avaliar diferentes situações, também provando a capacidade desejada de generalização da rotina desenvolvida.

A rotina computacional desenvolvida concentra, ainda, as informações de equipamentos de diferentes fabricantes e as analisa em *software* único, reduzindo a quantidade de dados que equipes de engenharia devem processar e o número de diferentes programas que são tipicamente manipulados em uma ocorrência. Esse conjunto de propriedades interessa muito aos operadores de tempo real do SEP e as equipes de engenharia, proteção e manutenção, simplificando seus trabalhos e acelerando diversos de seus processos

rotineiros.

O conjunto de capacidades do sistema desenvolvido deve trazer vantagens às concessionárias em que for implantado. É o caso da TAESA, em que o solução proposta está em operação desde Março de 2021, auxiliando na análise de ocorrências do sistema de potência. Nesse contexto real, a aplicação tem se mostrado eficiente em diagnosticar de modo correto a função de distância das linhas em que está instalada.

Evidentemente, a solução proposta apresenta limitações. Uma das mais relevantes está associada a componentes não bem representados pelo modelo de IED embutido na aplicação, que pode fazer com que situações em que os comportamentos são corretos não consigam ser adequadamente identificados ou apresentem resultados suspeitos, como para a ocorrência na linha de transmissão de circuito duplo apresentada. Além disso, pode exigir tentativa e erro para definição dos melhores pesos e constantes a serem utilizados como configuração da solução, o que é trabalhoso e lento.

Outras limitações e dificuldades podem ser encontradas para a solução proposta, porém não devem impactar de maneira relevante os diagnósticos gerados pelo *software* desenvolvido. Assim, conclui-se que a abordagem *model-based* com raciocínios de *consistência* foi implementada de maneira adequada e eficiente, produzindo bons resultados para análise de operações reais de distância em diferentes linhas de transmissão e para diferentes modelos de IEDs e relés. Espera-se que a solução seja aplicada para avaliação de eventos reais e gere insumos para facilitar as rotinas das equipes de engenharia e manutenção de concessionárias de energia elétrica.

8.1 Propostas de Continuidade

A rotina desenvolvida para diagnóstico das operações de proteção de distância, embora eficiente e adequada, ainda apresenta limitações, que podem ser objetos de novos estudos. Primeiramente, podem ser desenvolvidas abordagens que permitam incluir nos modelos desenvolvidos os comportamentos menos comuns e exclusivos para diferentes IEDs de diferentes fabricantes. Esse problema pode também ser tratado com aperfeiçoamentos ou novas abordagens para as funções de diagnóstico, para que sejam ignorados ou padronizados os comportamento avaliados, sendo possível objeto de novo estudo.

Além de abordagens de tratamento para IEDs e relés cujas características não se encaixam no modelo básico desenvolvido, deve ser estudado também os valor de pesos, para que se determine coeficientes globais aplicáveis a diferentes cenários e proteções, eliminando processos de tentativa e erro e reduzindo o volume de configurações necessárias pelo usuário. Também, deve-se avaliar o impacto do uso de diferentes formas de onda e seu fator de ponderação no cálculo do comportamento global dos equipamentos, se a utilização das ativações de zonas de fase e terra é realmente adequada ou se outros critérios melhores

podem ser estabelecidos.

O uso de redes de Petri possibilitou a separação entre lógica operacional da proteção e a de avaliação das zonas de distância. Utilizando as lógicas operacionais dessas redes, novas funções de proteção, como a de sobrecorrente, podem ser incluídas no sistema desenvolvido através de pequenas modificações. Essa possibilidade, por si só, já gera uma infinidade de tópicos para pesquisa e estudo, seja com as melhores formas de modelagem para outros tipos de proteção, seja com as formas de redes que produzem melhores cenários para análise de cada nova função.

Também, é importante destacar que o modelo desenvolvido não realiza o tratamento de todas as situações possíveis e verificadas em campo. Um desses fenômenos são as oscilações de potência e que podem ser tema de novos estudos, em especial por exigirem modificações e aperfeiçoamento dos modelos de proteção de distância desenvolvidos. Outro está associado às variações na resistência de falta durante o evento de falha, que pode motivar também novas pesquisas. Tem-se, ainda, o tratamento dos comportamentos dinâmicos das zonas de proteção, não representados nos modelos elaborados devido à utilização de unidades de impedância para descrevê-las. Assim, novos trabalhos podem ser pensados para estudar os efeitos dessa escolha e criar representações mais complexas, por exemplo, utilizando comparadores, que habilitariam o tratamento dessas dinâmicas diretamente nas zonas configuradas para os relés.

Todas as propostas de continuidade apresentadas estiveram baseadas no uso de técnicas *model-based* com raciocínios de *consistência*, porém podem ser exploradas ainda outras abordagens, em especial as *knowledge-based* para diagnóstico do sistema. Abordagens utilizando aprendizado de máquina ou ciência de dados, áreas de tecnologia da informação em alta no momento, formam todo um campo de estudo que pode ser explorado para o desenvolvimento de outros métodos de diagnóstico de proteções de distância.

Por fim, um tópico bastante interessante para continuidade do trabalho seria a avaliação de performance comparativa da abordagem desenvolvida com outras técnicas *model-based* disponíveis. Também é possível compará-la aos métodos *knowledge-based* para determinação do melhor tratamento do problema.

De modo geral, a área de diagnóstico de proteção ainda pode ser muito expandida com o estudo de diferentes tópicos. Portanto, são infinitas as possibilidades para continuidade e ampliação dos desenvolvimentos desse trabalho, tendo sido apresentada algumas das mais relevantes delas.

Referências

AALST, W. M. P. van der. Interval timed coloured petri nets and their analysis. In: MARSAN, M. A. (Ed.). *Application and Theory of Petri Nets 1993*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993. p. 453–472. ISBN 978-3-540-47759-4. Citado 7 vezes nas páginas 63, 64, 65, 66, 69, 70 e 71.

ADELSBERGER, H. H. Prolog programming language. In: MEYERS, R. A. (Ed.). *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Third edition. New York: Academic Press, 2003. p. 155–178. ISBN 978-0-12-227410-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012227410500853X>>. Citado na página 25.

ALVES, H. N. Fault diagnosis and evaluation of the performance of the overcurrent protection in radial distribution networks based on wavelet transform and rule-based expert system. In: *2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 34.

ANEEL, A. N. de E. E. *Resolução Normativa N° 729, de 28 de Junho de 2016*. [S.l.], 2016. Citado na página 17.

ANEEL, A. N. de E. E. *Avaliação dos Resultados da Qualidade dos Serviço de Transmissão de Energi Elétrica*. [S.l.], 2020. Citado na página 17.

ANEEL, A. N. de E. E. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - prodist. In: *Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 16.

ANEEL, A. N. de E. E. *Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica*. 2020. Página da Web. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d>>. Acesso em: 07 nov 2020. Citado na página 20.

ANEEL, A. N. de E. E. *Histórico dos Indicadores de Qualidade: Parcela Variável e Adicional à RAP*. 2021. Página da Web. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2Fweb%2Fguest%2Fbusca&_101_assetEntryId=14472104&_101_type=content&_101_groupId=656823&_101_urlTitle=relatorios&inheritRedirect=true>. Acesso em: 14 abril 2021. Citado na página 17.

ANEEL, A. N. de E. E. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - prodist. In: *Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 16.

BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. *Introdutction to Applied Linear Algebra: Vectors, Matrices, and Least Squares*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2019. ISBN 9781108583664. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

BRACEWELL, R. *The Fourier Transform & Its Applications*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1999. ISBN 978-0073039381. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 91.

BUCHANAN, B. G. A (very) brief history of artificial intelligence. *AI Magazine*, v. 26, n. 4, p. 53–60, 2006. Citado na página 28.

CARDOZO, E.; TALKDAR, S. N. A distributed expert system for fault diagnosis. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 641–646, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

ČEPIN, M. Event tree analysis. In: _____. *Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications*. London: Springer London, 2011. p. 89–99. ISBN 978-0-85729-688-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-688-7_6>. Citado na página 34.

CHEN, W. H.; LIU, C. W.; TSAI, M. S. On-line fault diagnosis of distribution substations using hybrid cause-effect network and fuzzy rule-based method. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 15, n. 2, p. 710–717, Abril 2000. Citado na página 28.

CHIN, H. C. Fault section diagnosis of power suestem using fuzzy logic. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 18, n. 1, p. 245–250, Fevereiro 2003. Citado na página 28.

CONFORTI, M.; CORNUÉJOLS, G.; ZAMBELLI, G. *Integer Programming*. [S.l.]: Springer, 2014. ISBN 978-3-319-11007-3. Citado na página 29.

DA SILVA, A. J. N. *Análise Organizacional de Acidentes de Trabalho no Setor de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado, Faculdade de Medicina - UNESP) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, 2015. Citado na página 17.

DAVIDSON, E. M.; McArthur, S. D. J.; McDonald, J. R. A toolset for applying model-based reasoning techniques to diagnostics for power systems protection. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 2, p. 680–687, Maio 2003. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 27.

DEO, N. *Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1974. ISBN 0-13-363473-6. Citado na página 85.

DIJKSTRA, E. W. Algol 60 translation : An algol 60 translator for the x1 and making a translator for algol 60. In: _____. *Research Report 35*. Amsterdam: Mathematisch Centrum, 1961. Disponível em: <<https://www.cs.utexas.edu/users/EWD/MCReps/MR35.PDF>>. Citado na página 97.

DING, S. X. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms and Tools*. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2008. ISBN 978-1-4471-4799-2. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 22.

DY LIACCO, T. E.; KRAYNAK, T. J. Processing by logic programming of circuit-breaker and protective-relaying information. *IEEE Transactions on Power Apparatur and Systems*, PAS-88, n. 2, p. 171–175, Fevereiro 1969. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

- ECMA, E. C. M. A. I. The json data interchange syntax. In: _____. *Standard ECMA-404*. WORLD SCIENTIFIC, European Computed Manufactures Association (ECMA) International. Disponível em: <https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-404_2nd_edition_december_2017.pdf>. Citado na página 76.
- FORTIER, R. J.; MICHEL, H. E. 9 - petri nets. In: FORTIER, R. J.; MICHEL, H. E. (Ed.). *Computer Systems Performance Evaluation and Prediction*. Burlington: Digital Press, 2003. p. 279–303. ISBN 978-1-55558-260-9. Citado na página 63.
- FUKUI, C.; KAWAKAMI, J. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, PWRD-1, n. 4, p. 83–90, Outubro 1986. Citado na página 25.
- GE Grid Solutions. *D60 Line Distance Protection System - Instruction Manual*. Revision 7.8x. [S.l.: s.n.], 2018. Citado 3 vezes nas páginas 116, 122 e 140.
- GILCREST, G. B.; ROCKEFELLER, G. D.; UDREN, E. A. High-speed distance relaying using a digital computer. *IEEE Transactions on Power Apparatur and Systems*, PAS-91, n. 3, p. 1235–1243, Maio 1971. Citado na página 24.
- GOODY, J. L. H. et al. Automatic evaluation of transmission protection using information from digital fault recorders. In: *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434)*. [S.l.: s.n.], 1997. p. 414–417. Citado na página 33.
- GRAUPE, D. *Principles of Artificial Neural Networks*. 3rd. ed. WORLD SCIENTIFIC, 2013. Disponível em: <<https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/8868>>. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 89.
- GROSAN, C.; ABRAHAM, A. Rule-based expert systems. In: _____. *Intelligent Systems: A Modern Approach*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 149–185. ISBN 978-3-642-21004-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21004-4_7>. Citado na página 25.
- GUO, W. et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1393–1401, Julho 2010. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- HAMILTON, F. L.; LEGG, M.; PATRICKSON, J. B. Application of transistor techniques to relays and protection for power systems. In: *Proceedings of The Institution of Electrical Engineers*. [S.l.: s.n.], 1967. v. 114, n. 2, p. 213–227". Citado na página 24.
- HEATON, J. *Introduction to the Math of Neural Networks*. 1. ed. [S.l.]: Heaton Research, Inc., 2012. ISBN 9781604390339. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 89.
- HØIDALEN, H. K.; PRIKLER, L.; PEÑALOZA. *ATPDRAW version 7.0 for Windows Users' Manual*. Preliminary release no. 1.0. [S.l.: s.n.], 2019. Citado 3 vezes nas páginas 20, 100 e 101.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power System Relaying*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2014. ISBN 978-1-118-66200-7. Citado 7 vezes nas páginas 48, 49, 50, 51, 52, 53 e 54.

- HUGHES, I. G.; HASE, T. P. A. *Measurements and their Uncertainties*. 1. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2010. ISBN 978-0199566334. Citado na página 84.
- IEC, I. E. C. *Measuring relays and protection equipment - Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems - IEEE Std C37.111*. 2. ed. [S.l.]: International Electrotechnical Commission - IEC, 2013. ISBN 978-2-83220-766-6. Citado na página 39.
- IEEE Power System Relaying Committee. *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*. [S.l.], 2004. Citado 3 vezes nas páginas 99, 102 e 103.
- IEEE-SA Standards Board. *IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus - IEEE Std C37.90*. [S.l.]: IEEE, 2006. Citado na página 36.
- JENKINS, L.; KHINCHA, H. P. Deterministic and stochastic petri net models of protection schemes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 84–90, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 73.
- JENSEN, K.; KRISTENSEN, L. M. *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-00283-0. Citado 6 vezes nas páginas 63, 64, 65, 66, 67 e 68.
- JEYASURYA, B. et al. Fault diagnosis using substation computer. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 1195–1201, 1990. Citado na página 17.
- JOHANNES, F. Decision tree. In: _____. *Encyclopedia of Machine Learning*. Boston, MA: Springer US, 2010. p. 263–267. ISBN 978-0-387-30164-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_204>. Citado na página 32.
- JUNGNICKEL, D. *Graphs, Networks and Algorithms*. 4. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-32278-5. Citado na página 85.
- KEZUNOVIC, M. Use of intelligent techniques for analysis of faults and protective relay operations. In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 34.
- KEZUNOVIC, M.; POPOVIC, T. Substation data integration for automated data analysis systems. In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 34.
- KEZUNOVIC, M. et al. An expert system fo transmission substation event analysis. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 8, n. 4, p. 1942–1949, Outubro 1993. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 33.
- KORBICZ, J. et al. *Fault Diagnosis: Models, Aritificial Intelligence, Applications*. [S.l.]: Springer, 2003. ISBN 978-3-642-62199-4. Citado na página 22.
- LIN, X. et al. A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm-tabu search. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 25, n. 3, p. 1268–1274, Julho 2010. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- LOPES, F. V. et al. Disturbance analysis and protection performance evaluation. In: *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2015*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 33.

- LOPES, F. V. et al. Methodology for protection performance evaluation on power transmission networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 2, p. 769–778, Abril 2018. Citado 6 vezes nas páginas 33, 34, 35, 74, 87 e 97.
- LUO, X.; KEZUNOVIC, M. An expert system for diagnosis of digital relay operation. In: *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- LUO, X.; KEZUNOVIC, M. Implementing fuzzy reasoning petri-nets for fault section estimation. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 23, n. 2, p. 676–685, Abril 2008. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- MANN, B. J.; MORRISON, I. F. Digital calculation of impedance for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Apparatur and Systems*, PAS-90, n. 1, p. 270–279, Janeiro/Fevereiro 1971. Citado na página 24.
- MANN, B. J.; MORRISON, I. F. Relaying a three phase transmission line with a digital computer. *IEEE Transactions on Power Apparatur and Systems*, PAS-90, n. 2, p. 742–750, Março/Abril 1971. Citado na página 24.
- MATSUMOTO, K.; SAKAGUCHI, T.; WAKE, T. Fault diagnosis of a power system based on a description of the structure and function of the relay system. *Expert Systems*, v. 2, n. 3, p. 134–138, 1985. Citado na página 24.
- McArthur, S. D. J. et al. Knowledge and model based decision support for power system protection engineers. In: *Proceedings of International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 215–219. Citado na página 27.
- MCARTHUR, S. D. J.; DAVIDSON, E. M. Automated post-fault diagnosis of power system disturbances. In: *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 33.
- McArthur, S. D. J. et al. The application of model based reasoning within a decision support system for protection engineers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 4, p. 1748–1754, Outubro 1996. Citado na página 27.
- McArthur, S. D. J. et al. Expert systems and model based reasoning for protection performance analysis. In: *IEE Colloquium on Artificial Intelligence Applications in Power Systems*. [S.l.: s.n.], 1995. Citado na página 27.
- MOZETIČ, I. Model-based diagnosis: An overview. In: MŘRÍK, V.; ŠTĚPÁNKOVÁ, O.; TRAPPL, R. (Ed.). *Advanced Topics in Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992. p. 419–430. ISBN 978-3-540-47271-1. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989. Citado 9 vezes nas páginas 58, 59, 60, 61, 62, 66, 67, 69 e 80.
- NATKE, H. G.; CEMPEL, C. *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems: Fundamentals, Detection, Localization, Assessment*. [S.l.]: Springer, 1997. ISBN 978-3-642-64395-8. Citado na página 22.

- NOVELO, A. F. et al. Fault diagnosis of electric transmission lines using modular neural networks. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 8, p. 3663–3668, Agosto 2016. Citado na página 31.
- ONS, O. N. do S. E. Procedimentos de rede. In: *Submódulo 9.2 - Indicadores de desempenho de equipamentos e linhas de transmissão e das funções transmissão e geração*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 16.
- ONS, O. N. do S. E. Procedimentos de rede. In: *Submódulo 8.3 - Apuração mensal de serviços e encargos da transmissão e encargos setoriais*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 16.
- ONS, O. N. do S. E. Procedimentos de rede. In: *Submódulo 3.10 - Estudos para segurança operacional elétrica*. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 16.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998. ISBN 0-13-754920-2. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. [S.l.]: Prentice-Hall International, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 38, 41, 42 e 43.
- PAPOULIS, A. *The Fourier Integral and Its Applications*. [S.l.]: Dover Publications Inc., 2018. ISBN 978-0486823799. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 91.
- PESENTE, J. et al. A procedure to automate the assessment of generator protection. *Electric Power Systems Research*, v. 196, 2021. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621002285>>. Citado na página 33.
- QUINTERO-ZULUAGA, J. F. et al. Decision tree-based automated test-bed for performance validation of line protection relays using a hardware-in-the-loop architecture. In: *2020 IEEE Colombian Conference on Applications of Computational Intelligence (IEEE ColCACI 2020)*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 32.
- REIS, R. et al. Hardware-in-the-loop validation of a protection performance analysis platform. In: *2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 33.
- REITER, R. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, v. 32, n. 1, p. 57–95, Novembro 1987. ISSN 0004-3702. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0004370287900622>>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ROCKEFELLER, G. D. Fault protection with a digital computer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 438–464, Abril 1969. Citado na página 24.
- ROMEIS, C.; BILLER, M.; JAEGER, J. Use of petri-nets to describe and verify protection system models for time domain simulations. In: *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado 5 vezes nas páginas 73, 74, 79, 81 e 126.

- SA, J. L. Pinto de; DAMASIO, J. Coordination of automatic control functions in transmission substations, using petri nets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 262–268, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 73.
- SACHDEV, M. S.; BARIBEAU, M. A. A new algorithm for digital impedance relays. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-98, n. 6, p. 2232–2240, Novembro 1979. Citado 6 vezes nas páginas 19, 36, 43, 45, 46 e 47.
- SARKER, R. A.; NEWTON, C. S. *Optimization Modelling A Practical Approach*. [S.l.]: CRC Press, 2008. ISBN 978-1-4200-4310-5. Citado na página 30.
- Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. *SEL-421 Relay Protection and Automation Systems - Instruction Manual - User's Guide*. No. 1.0. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 139.
- SEKINE, Y. et al. Fault diagnosis of power systems. In: *Proceedings of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 1992. v. 80, n. 5, p. 673–683. Citado na página 26.
- SHENOI, B. A. *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN 978-0-471-46482-2. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- SIDHU, T. S. et al. *WG B5.17 - Relay software models for use with electromagnetic transient analysis programs*. [S.l.]: CIGRE, 2006. Citado 11 vezes nas páginas 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 48, 55 e 56.
- SREERAMA, R.; SWARUP, K. S. Detection, localization and fault diagnosis using petrinets for smart power distribution grids. In: *2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS)*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 32.
- SUN, J.; QIN, S. Y.; SONG, Y. H. Fault diagnosis of electrical power systems based on fuzzy petri nets. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 19, n. 4, p. 2053–2059, Novembro 2004. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- SWARUP, K. S.; CHANDRASEKHARAIHAH, H. S. Power system fault diagnosis using artificial neural networks. In: *ACE '90. Proceedings of [XVI Annual Convention and Exhibition of the IEEE In India]*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 81–85. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- TAESA. *Projeto 0048: Metodologia e Ferramenta para Análise Automática de Ocorrências Utilizando Algoritmos de Aprendizado de Máquina*. 2020. Página da Web. Disponível em: <<https://institucional.taesa.com.br/pesquisa/projeto-0048metodologia-e-ferramenta-para-analise-automatica-de-ocorrencias-utilizando-algoritmos-de-aprendizado-de-maquina/>>. Acesso em: 07 nov 2020. Citado na página 20.
- TAHARA, I.; NOBESAWA, S. Reasoning with inconsistent knowledge base. *Systems and Computers in Japan*, v. 37, n. 3, p. 41–48, 2006. Citado na página 27.
- TULIKDAR, S. N.; CARDOZO, E.; PERRY, T. The operator's assistant - an intelligent, expandable program for power sstem troule analysis. *IEEE Transaction on Power Systems*, PWRS-1, n. 3, p. 182–187, August 1986. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 25 e 26.
- WANG, F.; TANG, J. Modeling of a transmission line protection relaying scheme using petri nets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 3, p. 1055–1063, 1997. Citado na página 73.

- WANG, S.-C. Artificial neural network. In: _____. *Interdisciplinary Computing in Java Programming*. Boston, MA: Springer US, 2003. p. 81–100. ISBN 978-1-4615-0377-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0377-4_5>. Citado na página 26.
- WU, W. et al. Power system fault diagnosis with a weighted fuzzy time petri net. In: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012)*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 32.
- XU, J.; YUE, H. Research on fault diagnosis method of power grid based on artificial intelligence. In: *2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 113–116. Citado na página 32.
- ZADEH, L. A. Fuzzy logic. *Computer*, v. 21, n. 4, p. 83–93, Abril 1988. Citado na página 28.
- ZHANG, H. et al. Simulation of colored time petri nets. In: *2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 637–642. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.
- ZHANG, N.; KEZUNOVIC, M. Verifying the protection system operation using an advanced fault analysis tool combined with the event tree analysis. In: *In Proc. 2004 3th Annual North American Power Symposium*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 133–139. Citado na página 34.
- ZHANG, Y. et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems utilizing redundancy and temporal information of alarm messages. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 31, n. 6, p. 4877–4886, Novembro 2016. Citado na página 31.
- ZIEGLER, G. *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. 4. ed. [S.l.]: Publicis Publishin, 2011. ISBN 978-3-89678-667-9. Citado 6 vezes nas páginas 36, 37, 38, 54, 55 e 104.

Apêndices

APÊNDICE A – Parâmetros de Proteção para Ocorrências Reais Avaliadas

A.1 Linha de Transmissão em Circuito Único

A linha de transmissão de circuito simples tem os parâmetros apresentados para o *Terminal 1* e *Terminal 2* na [Tabela 16](#) e [Tabela 17](#), respectivamente, definidos conforme guia de uso dos modelos de IED em campo, o SEL-421 ([Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2011](#)). Esses dois equipamentos contaram com lógica de operação e *trip* para detecções de zona 2, fase ou terra, além da lógica de ativação temporal tradicional de proteções de distância. Além disso, ambos terminais da linha se conectam no esquema de *trip* assistido do tipo POTT2, com o canal modelado com um atraso de tempo de 0,015 ms.

Tabela 16 – Configuração da proteção de distância do *Terminal 1* para linha de transmissão de circuito simples.

Tipo	Parâmetro	Valor (Ω)	Atraso de Tempo (s)
Distância de Terra	Alcance de Zona Reversa	43,04	0,0
	Alcance de Zona 1	19,00	0,0
	Alcance de Zona 2	71,74	0,2
Distância de Fase	Alcance de Zona Reversa	43,05	0,0
	Alcance de Zona 1	29,50	0,0
	Alcance de Zona 2	71,74	0,2

Tabela 17 – Configuração da proteção de distância do *Terminal 2* para linha de transmissão de circuito simples.

Tipo	Parâmetro	Valor (Ω)	Atraso de Tempo (s)
Distância de Terra	Alcance de Zona Reversa	43,04	0,0
	Alcance de Zona 1	20,68	0,0
	Alcance de Zona 2	71,74	0,2
Distância de Fase	Alcance de Zona Reversa	43,04	0,0
	Alcance de Zona 1	22,45	0,0
	Alcance de Zona 2	71,74	0,2

A.2 Linha de Transmissão em Circuito Duplo

Nas condições da ocorrência, o *Terminal 1* e *Terminal 2* foram configurados conforme os parâmetros da [Tabela 18](#) e da [Tabela 19](#), respectivamente, definidos de acordo com os manuais de instrução para os IEDs D60 ([GE Grid Solutions, 2018](#)). Foi utilizado um esquema de proteção do tipo POTT2 para conectar ambas proteções da linha de transmissão, com canal de tempo modelado com atraso de 0,025 ms.

O IED no *Terminal 1* teve as zonas de proteção configuradas com atrasos de 0,00833 s, 0,35 s e 1,5 s, da zona 1 a zona 3, tanto para as unidades de fase quanto de terra do sistema. Em oposição, o relé no *Terminal 2* estava com atrasos temporais ajustados para 0,0 s, 0,40 s e 1,5 s para as zonas 1, 2 e 3, respectivamente, para ambas elementos de proteção.

A lógica sequencial tradicional da proteção de distância foi mantida para ambos IEDs, com comando de *trip* apenas em ativações de primeira zona de fase ou terra.

Tabela 18 – Configuração da proteção de distância do *Terminal 1* para linha de transmissão de circuito duplo.

Referência	Parâmetro	Valor
Distância de Fase		
Zona 1	Alcance de Zona (REACH)	43,67 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	75°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	30 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Zona 2	Alcance de Zona (REACH)
Ângulo Característico (RCA)		87°
Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)		90°
Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)		65°
Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)		75°
Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)		30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°

Referência	Parâmetro	Valor
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Alcance de Zona (REACH)	93,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
Zona 3	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	75°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Alcance de Zona (REACH)	30,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	50°
Zona Reversa	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	65°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	25,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	25,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
Distância de Terra		
	Alcance de Zona (REACH)	43,67 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
Zona 1	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	80°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
Zona 2	Alcance de Zona (REACH)	65,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°

Referência	Parâmetro	Valor
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	80°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Alcance de Zona (REACH)	93,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
Zona 3	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	80°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Alcance de Zona (REACH)	40,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	50°
Zona Reversa	Limite do Comparador de Ângulo para a Função de Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	65°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°

Tabela 19 – Configuração da proteção de distância do *Terminal 2* para linha de transmissão de circuito duplo.

Referência	Parâmetro	Valor
Distância de Fase		
Zona 1	Alcance de Zona (REACH)	43,67 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	75°
	Posição no Eixo R do <i>Blínder</i> Direito (RGT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blínder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blínder</i> Esquerdo (LFT BLD)	30 Ω
	Posição Angular do <i>Blínder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Zona 2	Alcance de Zona (REACH)
Ângulo Característico (RCA)		87°
Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)		90°
Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)		65°
Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)		75°
Posição no Eixo R do <i>Blínder</i> Direito (RGT BLD)		30,00 Ω
Posição Angular do <i>Blínder</i> Direito (RGT BLD RCA)		86°
Posição no Eixo R do <i>Blínder</i> Esquerdo (LFT BLD)		30,00 Ω
Posição Angular do <i>Blínder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)		86°
Zona 3		Alcance de Zona (REACH)
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	75°
	Posição no Eixo R do <i>Blínder</i> Direito (RGT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blínder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blínder</i> Esquerdo (LFT BLD)	30,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blínder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Zona Reversa	Alcance de Zona (REACH)
Ângulo Característico (RCA)		87°

Referência	Parâmetro	Valor
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	50°
	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	65°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	25,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	25,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
Distância de Terra		
	Alcance de Zona (REACH)	43,67 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
Zona 1	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	80°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Alcance de Zona (REACH)	65,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°
Zona 2	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	80°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
Zona 3	Alcance de Zona (REACH)	98,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	65°

Referência	Parâmetro	Valor
	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	80°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°
	Alcance de Zona (REACH)	40,00 Ω
	Ângulo Característico (RCA)	87°
	Formato da Característica de Operação (COMP LIMIT)	90°
	Ângulo Característico da Função de Supervisão Direcional (DIR RCA)	50°
Zona Reversa	Limite do Comparador de Ângulo para Supervisão Direcional (DIR COMP LIMIT)	65°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Direito (RGT BLD RCA)	86°
	Posição no Eixo R do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD)	55,00 Ω
	Posição Angular do <i>Blinder</i> Esquerdo (LFT BLD RCA)	86°