



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESAÚ FIGUEROA ESCOTO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O DIAGNÓSTICO
DE FALTA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

A decorative graphic in the bottom right corner of the page. It features a blue background with a white grid pattern. The grid cells are filled with a pattern of small white dots, creating a halftone effect. The overall shape is a large, irregular polygon that tapers towards the bottom right.

ILHA SOLTEIRA
2020

ESAÚ FIGUEROA ESCOTO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O DIAGNÓSTICO
DE FALTA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Câmpus de Ilha
Solteira, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica.**

Área de Conhecimento: Automação

**Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
Orientador**

**ILHA SOLTEIRA
2020**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

E74d Escoto, Esaú Figueroa.
Desenvolvimento de modelos matemáticos para o diagnóstico de falta em sistemas de transmissão de energia elétrica / Esaú Figueroa Escoto. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
113 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Fábio Bertequini Leão
Inclui bibliografia

1. Programação linear inteira binária. 2. Diagnóstico de faltas. 3. Proteção de sistemas elétricos. 4. Sistemas elétricos de transmissão.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Divisão Técnica de Biblioteca e Documentação
CSUB - 9999


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Desenvolvimento de Modelos Matemáticos para o Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica

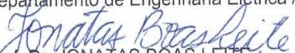
AUTOR: ESAU FIGUEROA ESCOTO

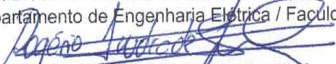
ORIENTADOR: FABIO BERTEQUINI LEÃO

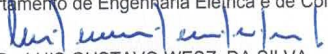
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. JONATAS BOAS LEITE
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. ROGERIO ANDRADE FLAUZINO
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP


Prof. Dr. LUIS GUSTAVO WESZ DA SILVA
Departamento de Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG

Ilha Solteira, 28 de fevereiro de 2020

A minha família, minha namorada, razão
de minha existência.

A Deus.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade e compaixão, por me permitir alcançar os sonhos que pareciam impossíveis. A meus pais Saúl (em memória) e Erminda, pelo amor, conselhos e ensinamentos que contribuíram na minha formação.

A minha irmã Ruth Nohemy, pelo amor, apoio e ser a pessoa que posso contar em qualquer momento.

A minha Noiva Nerlyn, pelo amor, compreensão, sendo essa pessoa que me traz alegria, calma e serenidade.

Ao Professor Fábio Bertequini Leão pela orientação, apoio, confiança e pela acolhida no momento crucial da minha carreira e no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Ozy Daniel Melgar pelos conselhos, amizade, pela disposição em sanar minhas dúvidas e por me indicar um melhor caminho.

A Carlos Sabillon, Darwin Quijano, Luis de Oro, pela amizade em todo momento.

A meus amigos Tayenne, Cleberton, Cindy, Hugo, Laura, Paty, Gabriel, Enielma pelo incrível tempo compartilhado.

À comissão examinadora pelos comentários e sugestões para melhorar a qualidade deste trabalho.

A todos os professores, companheiros do LaPSEE e funcionários da UNESP pelos conhecimentos e experiências compartilhadas, durante minha formação e na realização deste trabalho.

Aos apoios financeiros do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico processo nº 142046/2016-7, ao projeto temático da FAPESP processo nº 2015/21972-6 e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)- Código de Financiamento 001.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Martin Luther King)

RESUMO

Este trabalho apresenta modelos de programação não linear e linear inteira binária como novos métodos para resolver o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica. Os modelos de otimização são desenvolvidos com base no conjunto de coberturas mínimas e possui como restrições as equações que descrevem a lógica e a filosofia de proteção empregadas por empresas de energia elétrica. As equações de restrições modelam a associação dos alarmes dos relés de proteção informados pelo sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) com os estados esperados das funções dos relés de proteção. Os modelos de programação matemática realizam o diagnóstico de falta em uma única etapa, identificando a seção em falta através da análise dos estados dos disjuntores e das funções de proteção associadas a cada equipamento do sistema elétrico. O modelo proposto é um problema muito complexo de programação não linear inteira binária, portanto é reformulado como outro problema, em que algumas expressões são linearizadas, o que resulta em um modelo matemático de programação linear inteiro binário. A solução ótima obtida pelo modelo proposto é encontrada utilizando *solvers* comerciais de programação matemática. Os resultados obtidos mostram eficiência e robustez do modelo matemático. Na literatura, o problema de diagnóstico de falta é resolvido principalmente por técnicas heurísticas, portanto, o método proposto é inovador.

Palavras-chave: Programação linear inteira binária. Diagnóstico de faltas. Proteção de sistemas elétricos. Sistemas elétricos de transmissão.

ABSTRACT

This work presents nonlinear and binary linear programming models as a new method to solve the problem of fault diagnosis in electric power transmission systems. The optimization models are developed based on the set of minimum covers and has as restrictions the equations that describe the logic and protection philosophy used by electric power companies. The constraint equations model the association of the protection relay alarms reported by the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system with the expected states of the protection relay functions. The mathematical programming models performs the fault diagnosis in a single step, identifying the missing section through the analysis of the states of the circuit breakers and the protection functions associated with each electrical system equipment. The proposed problem is a very complex of binary integer nonlinear programming, so it is reformulated as another problem, in which some expressions are linear, resulting in a mathematical model of binary integer linear programming. The optimal solution obtained by the proposed model is using commercial solvers of mathematical programming. The results obtained show efficiency and robustness of the mathematical formulation. In the literature, the problem of fault diagnosis is solved mainly by heuristic techniques, therefore, the proposed method represents innovation.

Keywords: Binary integer linear programming. Fault diagnosis. Protection of electrical systems. Power systems transmission.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGA:	Algoritmo Genético Adaptativo
AMPL:	<i>A Modeling Language for Mathematical Programming</i>
ASCP :	Algoritmo de simulação do crescimento de uma planta
BBO:	<i>Biogeography-Based Optimization</i>
CEN:	<i>Cause-Effect Network</i>
Conopt:	<i>Convex Nonlinear Optimizer</i>
EMS :	<i>Energy management systems</i>
FDIR :	<i>Fault detection, isolation and restoration</i>
FRPN:	<i>Fuzzy Reasoning Petri-Nets</i>
HBM:	<i>Honey-Bee Mating Optimization</i>
IEDs :	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
IHM :	Interface Homem Máquina
ILOG CP:	<i>IBM ILOG CPLEX CP Optimizer</i>
Knitro:	<i>Nonlinear Interior-point Trust Region Optimizer</i>
LNC:	<i>Local Neural Classifiers</i>
OLS:	<i>Orthogonal Least Square</i>
PLIB:	Programação linear inteira binária
PNLIB:	Programação não linear inteira binária
PROLOG:	Programação Lógica
RBF-NN:	<i>Radial Basis Function Neural Network</i>
RNA:	Rede neural artificial
SCADA:	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEs:	Sistemas Especialistas
Snopt:	<i>Sparse Nonlinear Optimizer</i>
UBP:	<i>Unconstrained Binary Programming</i>
UTR:	Unidades Terminais Remotas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Subsistema de um sistema de proteção com relés e disjuntores.....	24
Figura 2 Ciclo de geração-teste de hipóteses para o raciocínio humano durante a resolução de problemas de diagnóstico	48
Figura 3 Modelo simples de SE.	50
Figura 4 Rede Causal para o diagnóstico da partida do motor.	52
Figura 5 Rede causal para um problema genérico.	54
Figura 6 Conjuntos efeitos (d_i) e causas (m_j) definidos para a teoria de cobertura parcimoniosa.....	55
Figura 7 Relações de espaços de soluções entre os tipos de critérios definidos para parcimônia. $\emptyset \subseteq S_{mc} \subseteq S_{ic} \subseteq S_{rc} \subseteq S_c \subseteq 2^D = S_c \cup S_n$	57
Figura 8 Rede Causal para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de potência.....	61
Figura 9 Diagrama genérico exemplificando a filosofia de proteção adotada.	66
Figura 10 Fluxograma do processo de otimização do método proposto	80
Figura 11 Sistema teste de 7 barras	83
Figura 12 Redução do esforço computacional pelo método proposto.	86
Figura 13 Sistema teste de 14 barras	87
Figura 14 Sistema teste de parte do sistema sul brasileiro.	91
Figura 15 Comparativo do esforço computacional dos métodos em estudo	96
Figura 16 Redução de tempo de processamento entre PNLIB e PLIB.	100
Figura 17 Sistema teste IEEE 39 Barras.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Cenários de falta múltiplas para simulações.....	83
Tabela 2 Diagnóstico de falta fornecidas pelas metodologias implementadas.....	84
Tabela 3 Alarmes reportados pelo sistema SCADA	87
Tabela 4 Diagnóstico de falta com o modelo PLIB	88
Tabela 5 Diagnóstico de falta com o modelo PNLIB e AGA.	89
Tabela 6 Cenários de falta para as simulações.....	92
Tabela 7 Diagnóstico de falta a partir das metodologias implementadas.....	93
Tabela 8 Comparação do esforço computacional entre PNLIB e PLIB.	98
Tabela 9 Alarmes reportados pelo sistema SCADA	102
Tabela 10 Diagnóstico de falta fornecido pelo modelo PLIB proposto.....	102
Tabela 11 Diagnóstico de falta fornecido pelo modelo PNLIB.....	103
Tabela 12 Diagnóstico de falta fornecido pelo AGA	104

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
A.	JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	16
B.	OBJETIVO GERAL.....	18
C.	TRABALHOS PUBLICADOS.....	18
D.	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
A.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
B.	O PROBLEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	20
1.1.1	Caracterização do problema	20
1.1.2	Alarmes e os sistemas elétricos	23
1.1.3	Proteção de sistemas elétricos de potência	24
C.	MÉTODOS E TÉCNICAS PROPOSTOS NA LITERATURA PARA A RESOLUÇÃO DO PDFSTEE	29
D.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
3	TEORIA DE COBERTURA PARCIMONIOSA	43
A.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	43
B.	ABDUÇÃO E DIAGNÓSTICO POR INFERÊNCIA.....	44
C.	PROBLEMAS DE DIAGNÓSTICO: DEFINIÇÃO E RESOLUÇÃO	47
1.1.4	Modelos Computacionais para Resolução de Problemas de Diagnóstico	49
1.1.5	Formalização da Teoria de Cobertura Parcimoniosa	51
4	MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR	59
A.	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALTAS	60
1.1.6	Teoria de cobertura parcimoniosa aplicada ao diagnóstico de faltas em sistemas elétricos de potência	60
1.1.7	Modelo de operação do sistema de proteção	63

B.	MODELO MATEMÁTICO DE PNLIB PROPOSTO.....	67
1.1.8	Descrição dos conjuntos, variáveis e parâmetros do modelo matemático	68
1.1.9	Descrição das relações do modelo proposto.....	72
C.	MODELO DE PLIB PARA O DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	75
1.1.10	Linearização da restrição (I_{n_i}).....	75
1.1.11	Linearização da restrição dos estados esperados dos relés diferenciais (DP).....	75
1.1.12	Linearização da restrição dos estados esperados dos relés de distância (MP).....	76
1.1.13	Linearização das restrições <i>OR, BP, TP, BF</i>.....	77
D.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5	TESTES E RESULTADOS	82
A.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	82
B.	SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA DE 7 BARRAS.....	82
1.1.14	Estudo de caso: simulação 10.....	85
1.1.15	Desempenho do PLIB.....	85
C.	SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS.....	86
1.1.16	Estudo de caso: Simulação 5	89
D.	SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA SUL BRASILEIRO	90
1.1.17	Estudo de caso: simulação 6.....	97
1.1.18	Estudo de caso: simulação 7.....	98
1.1.19	Desempenho do PLIB.....	98
E.	SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA DE 39 BARRAS.....	100
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO TRABALHO.....	105
A.	CONCLUSÕES	105
B.	TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

Na operação de sistemas elétricos de potência surgem, com frequência, nos seus componentes anormalidades que resultam em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores conectados com esses sistemas, com a consequente redução da qualidade do serviço prestado. Os sistemas de energia elétrica são susceptíveis a ocorrência de anormalidades como sobrecargas, curto-circuito, subtensões e sobretensões mesmo seguindo as recomendações e normas mais severas existentes. As consequências dessas anormalidades poderão ser de pouca ou muita relevância, dependendo do sistema de proteção adotado. Em primeiro lugar o sistema de proteção deve assegurar a desconexão das seções do sistema elétrico submetidos a qualquer anormalidade que o faça operar fora do funcionamento previsto. Em segundo lugar os sistemas de proteção devem fornecer as informações necessárias aos operadores dos centros de controle do sistema elétrico para facilitar a identificação dos equipamentos com defeitos de modo a sua rápida recuperação (FILHO; MAMEDE, 2011).

Os centros de controle modernos possuem sistemas SCADA (*supervisory control and data acquisition*) e EMS (*Energy management systems*) capazes de transferir e gerenciar, respectivamente, as informações disponíveis do sistema de transmissão como o estado das linhas de transmissão, barras, transformadores e banco de baterias de cada subestação sendo essas informações utilizadas para o monitoramento e diagnóstico de anormalidades que possam ocorrer nos sistemas. O SCADA por sua vez realiza a interconexão entre as unidades terminais remotas (*UTR*) e os centros de operação através de um sistema de comunicação integrado e disponível aos operadores através da Interface Homem Máquina (IHM). Empregando as funções do EMS, como por exemplo, a FDIR (*fault detection, isolation and restoration*) os operadores, através de sua experiência, devem monitorar, e quando necessário, diagnosticar os alarmes informados pelos sistemas de proteção e monitoramento quando da ocorrência de faltas no sistema de energia elétrica.

Devido ao grande número de alarmes que podem ser produzidos pelos dispositivos de proteção, principalmente em situações de anormalidades, pode ser muito difícil e demorado ao operador interpretar e diagnosticar de forma correta e em pouco tempo a causa dos alarmes e desligamentos. Portanto é necessário que

metodologias sejam desenvolvidas para auxiliar os operadores a diagnosticar os alarmes nos centros de controle de forma rápida e eficiente.

Sistemas especialistas, redes neurais, meta-heurísticas, redes de Petri e lógica *Fuzzy* são métodos que têm sido desenvolvidos para o diagnóstico de faltas em sistemas elétricos, usando as informações dos relés e disjuntores provenientes dos sistemas de automação SCADA. No entanto, são poucos os trabalhos na literatura que resolvem este problema empregando técnicas de otimização exata.

Neste trabalho são propostos dois modelos matemáticos de programação não linear e linear inteira binária que obtêm a solução ótima do problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica (PDFSTEE) através de um software comercial. Os modelos de programação são baseados na teoria de coberturas mínimas (PENG; REGGIA, 1990; WEN; CHANG, 1998; WEN; HAN, 1995) que associa os alarmes informados pelo sistema SCADA e os estados esperados dos relés quando ocorre uma falta no sistema elétrico. É mostrado nos resultados que o modelo de programação linear inteira binária proposto é eficiente fornecendo o diagnóstico correto em todos os casos simulados, apresenta robustez computacional realizando os diagnósticos em um tempo de processamento aceitável e tendo a vantagem de não necessitar da calibração de parâmetros de controle nem treinamentos como as metodologias propostas na literatura.

A. JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

O vertiginoso incremento da demanda de energia elétrica implica na inevitável expansão e modernização dos atuais sistemas elétricos. Sendo assim, são esperados investimentos na expansão dos sistemas de transmissão e na construção de novas usinas geradoras a fim de ampliar a interligação e capacidade dos sistemas de energia elétrica. A modernização e o avanço das tecnologias dedicadas ao monitoramento e a proteção dos sistemas elétricos permitem que os sistemas elétricos sejam monitorados e protegidos de forma mais precisa e eficiente através da disponibilização aos operadores de grande quantidade de dados e alarmes em tempo real.

Portanto, a expansão juntamente com a modernização do sistema elétrico leva a necessidade do desenvolvimento de novas ferramentas computacionais capazes de lidar com os dados advindos dos sistemas SCADA modernos. A utilização cada vez mais ampla de dispositivos eletrônicos inteligentes ou IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) e o aumento no número de dispositivos a serem monitorados, elevam a gama de alarmes reportados durante contingências decorrentes de uma falta. Esses alarmes devem ser analisados por operadores dos centros de controle na tentativa de determinar quais equipamentos foram afetados e as ações requeridas para o reestabelecimento do serviço. Considerando a possibilidade de falhas e ajustes errôneos de dispositivos de proteção, falhas na rede de comunicação e a escassez de profissionais com experiência em operar o sistema, a dificuldade chega a tal ponto de complexidade que o ser humano não tem capacidade de responder satisfatoriamente em tempo hábil.

Nesse sentido, é relevante avançar significativamente na solução do problema de diagnóstico de faltas, explorando técnicas de otimização normalmente não empregadas para resolução, como as técnicas de otimização clássica, a fim de se incorporar a inovação ascendente aos processos de resolução de problemas em sistemas de potência e atender prontamente às necessidades emergentes. Desde que o tempo de resolução seja razoavelmente adequado ao problema, a resolução exata pode ser considerada mais vantajosa pela garantia de obter soluções de ótima qualidade e a não necessidade de treinamentos ou calibração de parâmetros complexos. O tempo de resolução ideal é aquele apresentado em tempo real. No

entanto, pode-se considerar adequado o tempo de resolução que não ultrapasse o tempo limite para as penalizações sobre os indicadores coletivos de continuidade.

Finalmente, os modelos matemáticos completos, com todas as relações matemáticas explícitas, ainda não são comumente empregados na resolução do problema de diagnóstico de faltas em sistemas de energia elétrica. O problema é tradicionalmente resolvido por métodos heurísticos de otimização, principalmente as meta-heurísticas. Na modelagem matemática do PDFSTEE, o desafio é considerar eficientemente todas as restrições relacionadas a topologia do sistema ao modelo de operação e lógica de atuação das funções de proteção. Portanto, as propostas baseadas em modelos matemáticos completos apresentam novos desafios para a otimização do PDFSTEE e trazem significativa contribuição à literatura.

Conforme o que foi mencionado, conclui-se que o modelo matemático proposto neste trabalho apresenta uma nova alternativa de solucionar o PDFSTEE, sendo esta sua principal contribuição. As contribuições deste trabalho se resumem da seguinte forma:

- O modelo de otimização proposto pode ser resolvido por métodos clássicos de otimização. A resolução do problema pelos métodos exatos permite encontrar soluções de ótima qualidade, o que não ocorre, necessariamente, quando o problema é resolvido por meio de técnicas heurísticas e meta-heurísticas. O PDFSTEE formulado é um problema complexo de otimização, no entanto, o modelo matemático proposto pode obter soluções em tempos considerados adequados ao problema nos casos testados;
- A formulação matemática proposta é genérica para o problema de diagnóstico de faltas sendo este trabalho de tese uma contribuição no sentido de estabelecer de forma estritamente matemática um modelo genérico e funcional baseado na lógica de atuação das funções de proteção e na filosofia adotada no sistema de potência monitorado.

B. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo matemático para a otimização do problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica. A proposta é encontrar soluções exatas para o problema através de técnicas de otimização clássica empregando solucionadores comerciais eficientes. A contribuição é estabelecida, uma vez que não é muito explorada na literatura especializada propostas de modelagem matemática para esta finalidade, ou seja, resolver de forma exata o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão exclusivamente por meio de modelos matemáticos.

C. TRABALHOS PUBLICADOS

Durante o desenvolvimento desta tese foram publicados os seguintes trabalhos:

ESCOTO, E. F.; LEAO, F. B. A nonlinear binary programming model for fault section estimation in electric power systems. **2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2017**, Ixtapa, . 2018-, n. Ropec, p. 1–6, 2018.

ESCOTO, E. F.; LEAO, F. B. A Binary Integer Linear Programming Model for Fault Section Estimation in Electric Power Systems. **2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2019**, Ixtapa, n. ROPEC, p. 1–6, 2019.

D. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 6 capítulos. O conteúdo de cada capítulo é apresentado, resumidamente, a seguir.

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução do trabalho e descrevem-se os objetivos e contribuições da pesquisa.

No Capítulo 2, faz-se uma abordagem sobre o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica e apresenta-se a revisão bibliográfica sobre as técnicas de resolução normalmente utilizadas na otimização do problema. O capítulo tem o objetivo de abordar as principais características do problema de diagnóstico de faltas, fundamentos básicos da proteção de sistemas elétricos e, através da revisão da literatura, apresentar os principais métodos de resolução propostos e as suas principais vantagens e desvantagens.

No capítulo 3, apresenta-se os conceitos que explicam a teoria de cobertura parcimoniosa. Esses princípios básicos são logo contextualizados e depois formalizados matematicamente para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão.

No capítulo 4, apresenta-se o modelo matemático de diagnóstico de faltas em sistemas elétricos formulado como um problema de PNLIB. Explica-se basicamente a descrição matemática, o tipo de problema de otimização e apresentação do modelo PLIB resultante para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão.

No Capítulo 5, apresenta-se o sistema teste utilizado para avaliar os modelos propostos, também são mostrados os resultados e a análise dos resultados obtidos com esses modelos matemáticos.

No Capítulo 6, apresentam-se algumas conclusões gerais baseadas no estudo realizado e a indicação de possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre o PDFSTEE. Consiste na apresentação dos critérios básicos do funcionamento de um sistema de proteção, e apresentação do problema de diagnóstico de faltas para sistemas elétricos. Além disso, são apresentadas as considerações que caracterizam a proteção dos dispositivos que compõe o sistema de transmissão. Apresentam-se os principais métodos propostos na literatura para resolver o problema.

B. O PROBLEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

1.1.1 Caracterização do problema

O sistema de energia elétrica consiste de diversas seções incluindo transformadores, barramentos e linhas de transmissão. Cada uma dessas seções é protegida por esquemas próprios de proteção, cuja função é detectar o estado anormal de operação e providenciar o seu desligamento com o objetivo de evitar os efeitos da falta no sistema elétrico. A proteção em si pode ser desempenhada por inúmeros dispositivos, na qual se destacam os relés de proteção e disjuntores, além de equipamentos de comunicação que auxiliam e acrescentam a confiabilidade ao sistema (ANDERSON, 1999).

Durante grandes contingências, a operação de relés de proteção e disjuntores alocados em diversas partes do sistema elétrico dão origem a um grande volume de alarmes, que dependendo da disponibilidade do sistema de comunicação são enviados, juntamente com outros valores supervisionados, aos centros de controle do sistema (HANDSCHIN *et al.*, 1996) .

Após a ocorrência de distúrbios com desligamentos definitivos, a prioridade é restaurar o sistema elétrico. No entanto, antes desta etapa é necessário (CARDOSO JR; ROLIM; ZÜRN, 2004):

- Identificar o(s) componente(s) que está(ão) em falta (selecionar a hipótese mais provável para explicar o defeito no sistema elétrico);
- Efetuar manobras para isolar o componente com defeito, caso seja necessária inspeção por parte das equipes de manutenção;
- Restaurar as partes do sistema atingidas pelo desligamento, mas que não estão em falta;
- Caso haja necessidade, as equipes de manutenção são deslocadas para que o defeito possa ser corrigido (isto geralmente ocorre quando algumas proteções operam desenergizando o equipamento protegido);
- Finalmente, restaurar a(s) seção(ões) onde ocorreu(am) o(s) defeito(s).

Destas etapas, a primeira corresponde à estimativa da seção em falta. Com a seleção da hipótese correta, consegue-se minimizar o tempo de interrupção e o risco de agravar a situação ou danificar equipamentos, religando-os indevidamente.

Uma grande variedade de dispositivos de proteção é instalada no sistema elétrico, dependendo do equipamento a ser protegido e do seu nível de tensão. Cada tipo de dispositivo de proteção é dotado de funcionalidades capazes de detectar o estado anormal do componente elétrico.

A aplicabilidade de um sistema para a estimativa da seção em falta depende de diferentes tipos de relés de proteção a serem considerados (HANDSCHIN; KUHLMANN; HOFFMANN, 1996):

- Relés diferenciais (transformadores, barras);
- Relés de distância (linhas);
- Relés de sobrecorrente instantâneo ou temporizado, com ou sem unidade direcional (linhas e transformadores);
- Relés de sobrecorrente de neutro temporizado, com ou sem unidade direcional (linhas e transformadores).

Geralmente, os relés instantâneos protegem o equipamento por meio de atuação instantânea e portanto são a proteção principal, enquanto que as unidades temporizadas servem como retaguarda caso os primeiros não atuem devido alguma falha.

Problemas inerentes ao diagnóstico de faltas envolvendo relés, disjuntores, canais de comunicação, entre outros, devem ser levados em consideração. A metodologia de solução a ser implementada deve ser escolhida levando-se em conta os seguintes fatores (CARDOSO JR; ROLIM; ZÜRN, 2004):

- Falhas em relés e/ou disjuntores e faltas múltiplas complicam o processo de localização da seção em falta. No primeiro caso a falta é eliminada através da proteção de retaguarda, implicando em uma grande área desligada. No segundo caso, o número de combinações possível torna o problema de estimação bastante complexo, devido a sua natureza combinatória;
- Aquisição de dados corrompidos;
- Falha no sistema de transmissão de dados e unidades terminais remotas;
- Perda de informações, quando o volume de dados a ser transmitido for muito grande. Esta situação pode surgir durante a ocorrência de falta extremamente grave com muitos desligamentos;
- Nem todas as subestações possuem registro sequencial de eventos;
- Imprecisão nos tempos de ocorrência dos eventos;
- Alarmes que surgem pela ocorrência de eventos secundários podem ser facilmente misturados com alarmes causados pela perturbação primária;
- Dificuldade em simular eventos raros e falta de dados históricos prejudica o progresso de trabalhos na área, uma vez que esses compõem a base para o desenvolvimento de metodologias de resolução do problema baseadas em conhecimento;
- A experiência do operador só pode ser obtida na prática, mas faltas severas ocorrem poucas vezes. A experiência adquirida sobre uma determinada falta, nem sempre é aplicável sobre a ocorrência de outras (FU *et al.*, 1995).

A estimação da seção em falta ou o diagnóstico de faltas é definido como um problema de tomada de decisão, onde várias hipóteses (seções em falta), previamente formuladas, competem entre si, cabendo ao operador ou à ferramenta computacional de apoio, selecionar a mais provável (PARK; AHN; KIM, 1999).

Finalmente, o diagnóstico de faltas é definido como um problema em que escolhe-se a melhor hipótese ou explicação para diagnosticar o defeito do sistema elétrico considerando um conjunto de alarmes recebidos através do sistema SCADA.

O diagnóstico corresponde a emitir a informação explícita da falta, ou seja, qual(is) seção(ões) ou componente(s) do sistema de potência está(ão) defeituoso(s) e portanto, apresentar ao operador a informação suficiente para que ele execute as ações necessárias. Neste trabalho o diagnóstico de faltas é caracterizado pela indicação da seção em falta e pelos dispositivos com atuação indevida.

1.1.2 Alarmes e os sistemas elétricos

Considerando o tamanho e a complexidade de um sistema elétrico de potência típico, um operador dificilmente será capaz de diagnosticar corretamente todas as condições anormais. Sofisticados programas computacionais foram desenvolvidos para automatizar este processo e chamar a atenção do operador para eventos notáveis tipicamente na forma de mensagens de alarme.

Alarmes podem ser gerados pelo sistema supervisório em diversas condições, como por exemplo, quando:

- Um valor medido por um transdutor excede um limite (por exemplo, uma sobretensão ou subtensão ou uma sobrecorrente);
- Um ponto digital muda de estado (por exemplo, a abertura de um disjuntor);
- Ocorre um erro em algum processo (por exemplo, quando ocorre um problema na execução de uma função automática);
- Uma falha de comunicação é detectada.

A definição de alarme é um pouco subjetiva. De uma maneira simplista, pode-se definir alarme como sintomas apresentados pelo sistema em consequência de eventos ocorridos (CARDOZO; TALUKDAR, 1988; FUSHUAN WEN; CHANG; SRINIVASAN, 1995). Outros autores preferem denominar eventos como “causas” ou “perturbações” e alarmes como “efeitos”, ou ainda “manifestações” (WEN; CHANG, 1998).

Nesta tese o termo “alarme” refere-se à manifestação de uma mensagem produzida pelo sistema supervisório, que visa sinalizar ao operador uma condição anormal detectada no sistema elétrico. O termo “evento” refere-se a uma perturbação (ou falta) no sistema elétrico que produz um determinado conjunto de alarmes.

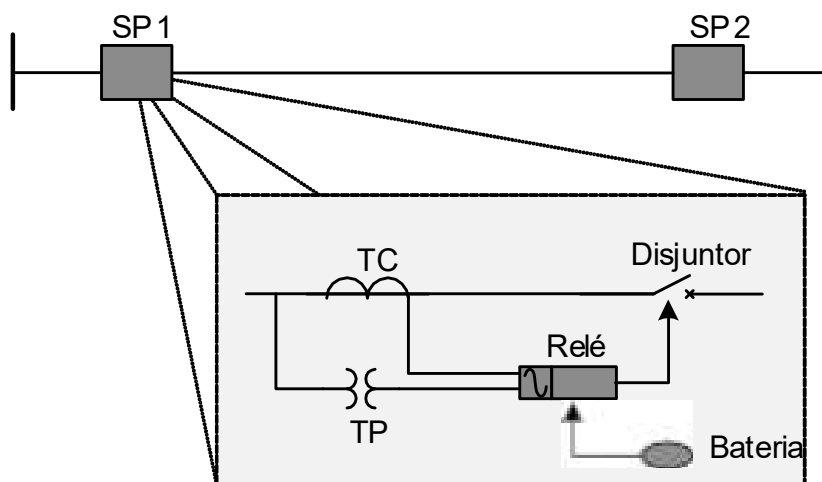
1.1.3 Proteção de sistemas elétricos de potência

Os equipamentos dos sistemas de transmissão de energia elétrica como barras, transformadores e linhas de transmissão basicamente são protegidos por relés e disjuntores.

Basicamente um sistema de proteção (SP) é composto por relé, transformadores de instrumentos de corrente (TC) e de potencial (TP), disjuntores e banco de baterias, conforme a Figura 1.

Os relés de proteção são dispositivos que monitoram constantemente grandezas elétricas em uma rede de energia elétrica, sendo estes responsáveis por atuar, quando for necessário, a abertura dos disjuntores. Os disjuntores são dispositivos mecânicos de abertura e fechamento de contatos comandados pelo relé, destinados à interrupção e restabelecimento das correntes elétricas num circuito. A operação de relés de proteção e disjuntores alocados em diversas partes do sistema elétrico dão origem a mensagens de alarmes, que dependendo da disponibilidade do sistema de transmissão de dados são enviados, juntamente com outros valores medidos, ao centro de controle (HANDSCHIN; *et al.*, 1996).

Figura 1 Subsistema de um sistema de proteção com relés e disjuntores.



Fonte Adaptado de (FRITZEN, 2012)

1.1.3.1 Atuação da proteção

A filosofia geral da proteção consiste em dividir o sistema de potência em zonas de proteção, para os seguintes equipamentos elétricos: Geradores; Transformadores; Barras; Linhas de transmissão; Motores.

Segundo Caminha (1977) existem dois princípios básicos a serem obedecidos, em sequência que são:

- Em nenhum caso a proteção atua, caso não exista defeito na sua zona de atuação;
- Considerando a forma, intensidade e localização do defeito, o desempenho da proteção deve corresponder exatamente àquilo que se espera.

A proteção primária ou de primeira linha, a proteção de retaguarda ou de socorro, e os relés auxiliares, compreendem os princípios fundamentais de releamento (CAMINHA, 1977).

A proteção primária é aquela em que uma zona de controle é estabelecida numa região ou seção próxima de cada elemento do sistema (seletividade), sendo os disjuntores comuns à conexão de cada dois elementos. Em torno dos disjuntores há uma superposição das zonas, visando o socorro em caso de falha da proteção principal (MASON, 1956).

Por outro lado, a proteção de retaguarda tem a função de operar quando a proteção primária falhar ou quando a mesma encontrar-se em manutenção (assumindo o papel da proteção primária). Por motivos econômicos só é utilizada em determinados elementos do sistema e somente contra curto-circuito. É desejável que os relés de retaguarda sejam arrançados independentemente das possíveis razões de falha da proteção primária, ou seja: falha do relé primário, corrente ou tensão fornecida ao relé; fonte de corrente fornecida ao disjuntor; circuito de disparo ou mecanismo do disjuntor (MASON, 1956).

Por fim, são atribuídas aos relés auxiliares as funções de multiplicação de contatos, sinalização ou temporização, etc. (MASON, 1956).

1.1.3.2 Proteção de Transformadores de Potência

A proteção de transformadores é amplamente especificada pelo tamanho, vulnerabilidade, acessibilidade, importância para a integridade do sistema, práticas operativas e econômicas. Quando, com base nestes fatores, o julgamento do engenheiro indicar que os tempos de operação mais lentos são satisfatórios, a proteção será realizada por meio de relés de sobrecorrente. Relés de pressão súbita ou diferenciais serão utilizados quando há necessidade de alta velocidade de atuação ou sensibilidade (IEEE COMMITTEE REPORT, 1981).

Geralmente os transformadores são afetados por ocorrência de curtos-circuitos nos enrolamentos, superaquecimento e circuito aberto. A falha de maior incidência é a monofásica, embora possam ocorrer faltas fase-fase, espira-espira, ou do enrolamento de alta para o de baixa tensão, podendo ser de ocorrência rápida ou lenta (BIONDI NETO; CHIGANER, 1999).

A proteção de um transformador pode ser classificada em dois grupos: contra sobrecarga, que evita o envelhecimento prematuro do isolante dos enrolamentos; e curtos-circuitos entre espiras e fases. Os casos de circuito aberto são raros e não destrutivos, sendo, pois desconsiderados nesta classificação (BIONDI NETO; CHIGANER, 1999).

É bastante comum grandes transformadores serem protegidos por meio da proteção diferencial (87) e Buchholz (63). A proteção de retaguarda é feita, por meio de relés de sobrecorrente. Pequenas unidades com alimentação unilateral podem conectar-se com a proteção através de relés de sobrecorrente temporizados (51) e/ou fusíveis. A proteção contra sobrecarga é realizada por meio de dispositivo térmico (26) e relé de imagem térmica (49) (CAMINHA, 1977).

A proteção diferencial percentual é ajustada para eliminar curtos-circuitos internos, entre espiras, bem como os efeitos decorrentes de arcos nas buchas. Nesse esquema a proteção compara as correntes de entrada e saída do elemento protegido, e o relé é sensibilizado quando a diferença entre essas correntes ultrapassar um valor de ajuste percentual (BIONDI NETO; CHIGANER, 1999).

Os benefícios, tanto na operação como na manutenção, da automatização e monitoramento de transformadores em subestações não assistidas são: eliminação

de desligamentos indevidos em função de falhas nos sensores e transdutores de temperatura; possibilidade de se operar o transformador em condição de sobrecarga compatível com as especificações do mesmo, permitindo atender a um pico de carga temporário. As informações provenientes de algoritmos de diagnóstico de faltas possibilitam a redução do tempo de pesquisa de defeitos e conseqüentemente aumento da disponibilidade do transformador, assim como um melhor acompanhamento de sua vida útil (CARNEIRO; STELZER; PILOTTO, 1999).

1.1.3.3 Proteção de Barras

Defeitos em barras devem ser isolados por meio da abertura de todos os disjuntores de todos os circuitos que a alimentam. Como este desligamento pode incluir geradores ou linhas de interligação, afetando grandes partes do sistema, é de suma importância que a proteção de barras funcione corretamente para defeitos exclusivamente nas barras, sendo insensível a defeitos externos. Os arranjos de barramentos são mais sofisticados para níveis mais altos de tensão, de modo a evitar a perda total da subestação, quando da ocorrência de perturbações.

Os defeitos em barras, geradores e transformadores não são em geral de natureza transitória, mesmo que a causa de origem o tenha sido; os danos causados são permanentes, com o que fica vedada a possibilidade de reaplicação imediata de tensão. Estes equipamentos são em geral tão bem protegidos contra à ação de elementos da natureza, bem como erros de operação, que as possibilidades de defeitos são muitíssimo menores do que em outros elementos do sistema, tais como linhas de transmissão (STEMMER; BASTOS, 1977).

A maneira mais elementar de obter proteção de barras é usando os relés dos circuitos que alimentam a barra a ser protegida nas subestações adjacentes. A barra fica incluída dentro da zona de proteção de retaguarda destes relés. Este tipo de proteção é simples (não há necessidade de novos relés) e evita a possibilidade de desligamento indevido de toda a barra por causa da operação acidental de um único relé. Em contrapartida apresenta uma baixa velocidade de atuação, pois depende da temporização dos relés de retaguarda (STEMMER; BASTOS, 1977).

Normalmente, em níveis mais altos (230 kV, ou mais) as barras possuem um esquema próprio de proteção, assim como também são incluídos os esquemas de

falha de disjuntor e estes equipamentos têm também proteção própria (discordância de polos, baixa pressão SF6 ou óleo, etc.).

1.1.3.4 Linhas de transmissão

Para proteção de linhas de transmissão são utilizados os relés de distância, localizados nas duas extremidades da mesma. Cada terminal é protegido por um relé de distância (21), que além de proteger seletivamente a linha é capaz de atuar como retaguarda local e remota para os equipamentos adjacentes à mesma. Várias filosofias podem ser empregadas e os relés podem ser calibrados para ter quatro diferentes zonas de atuação. Apesar desta diversidade de filosofias de proteção é possível generalizar a forma com que as proteções seletivas e de retaguarda atuam. Para faltas internas a atuação da proteção seletiva abre ambos os disjuntores da LT. Em faltas externas a atuação da proteção de retaguarda remota atua abrindo o disjuntor contrário a direção da falta.

C. MÉTODOS E TÉCNICAS PROPOSTOS NA LITERATURA PARA A RESOLUÇÃO DO PDFSTEE

Uma série de estudos realizados para resolver o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de energia elétrica é apresentado nesta seção. Estes estudos foram importantes no desenvolvimento deste trabalho, devido oferecerem diferentes pontos de vista nos quais é abordado o problema de diagnóstico de faltas. Portanto, apresentam-se com base na literatura os principais métodos e técnicas empregadas para resolver o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de energia elétrica.

Os sistemas especialistas (SEs) foram os primeiros métodos baseados em regras de inferência a serem usados no diagnóstico de faltas. Os sistemas especialistas geralmente apresentam uma arquitetura constituída por três módulos principais: uma base de conhecimento, um motor de inferência e uma interface com o usuário. Porém, apresentam problemas relativos à mudança de topologia da rede, o que implica na formulação de um grande número de regras, consumindo muito tempo durante a fase de implementação (FEUGENBAUM,1982, citado por CARDOSO JR; ROLIM; ZÜRN, 2004).

As pesquisas na área do problema começam a ser desenvolvidas mais vigorosamente a partir de 1986 com a publicação do artigo de Fukui e Kawami (1986) que desenvolveram um sistema de diagnóstico de faltas para subestações baseado em sistemas especialistas. O método requer como dados de entrada do sistema as informações dos estados dos relés e disjuntores que atuaram. Os autores desenvolvem a base do conhecimento por meio da linguagem PROLOG. A estimação das seções em falta é obtida através de mecanismo de inferência que explica cada operação dos relés.

Conforme mencionado pelos autores, o funcionamento do mecanismo de inferência é baseado nos padrões de combinação de regras e de fatos e com ajuda de ferramentas da linguagem PROLOG, que verificam os fatos e as regras armazenadas de modo a encontrar as seções sob falta que satisfazem cada regra. Diante disso fica evidente que este método limita-se a gerar resultados de acordo com as informações contidas em sua base de conhecimento, portanto, é incapaz de

fornecer a estimação de seções em falta sobre situações que não sejam cobertas pela base de conhecimento.

O trabalho de Jeyasurya *et al.* (1990) constitui a nova fase das metodologias para o diagnóstico de faltas. Neste artigo, é apresentado um sistema especialista que utiliza as regras de atuação de relés e abertura dos disjuntores como base de conhecimento. O motor de inferência empregado nesta metodologia é uma estratégia denominada *forward chaining*. Partindo dessa ideia, considerado os estados dos disjuntores e relés que atuaram, o mecanismo de inferência procura através a árvore de decisão até que os nós terminais sejam encontrados o que corresponde aos disjuntores com falha. Para encontrar as seções em falta, é usada uma lógica similar considerando as relações de operação de relés e seções do sistema elétrico.

A utilização desta metodologia apresentada conforme mencionado pelo autor, apresenta entre as principais vantagens: 1) a redução de sobrecarga do operador, pelo grande fluxo de informações e alarmes; 2) retenção do conhecimento da operação e atuação dos relés e disjuntores do sistema e 3) a redução de erros humanos, na tomada de decisões operativas. No entanto, observa-se a dificuldade de se adquirir, representar e validar o conhecimento de forma simples e completa para sistemas de grande porte.

Em Protopapas, Psaltiras e Machias (1991) os autores apresentam uma metodologia cuja base de conhecimento é formada por árvores de regras que englobam diferentes categorias de nós. Para cada falta ocorrida no sistema elétrico, a metodologia proposta pelos autores requer os dados de alarmes dos relés e disjuntores que atuaram e, nesse sentido, o mecanismo de inferência começa percorrendo as árvores de regras uma de cada vez. Sendo assim, utilizando a resposta do usuário e as informações armazenadas na base de conhecimento o sistema especialista decide o próximo passo e otimiza a solução.

De acordo com os autores, os resultados mostram que a metodologia apresenta como vantagem a capacidade de crescimento da base de conhecimento assim como a viabilidade de um operador não especialista interatuar com o SE. Pode-se perceber conforme citado acima, que qualquer mudança topológica no sistema elétrico, gerará a elaboração de um número de regras, o que implica consumo de muito tempo na fase de implementação.

Dois anos depois, Dabbaghchi e Gursky (DABBAGHCHI; GURSKY, 1993) foram os primeiros autores a empregarem a teoria de cobertura parcimoniosa no problema de diagnóstico de faltas em sistemas elétricos. O sistema especialista usa um motor de inferência abductiva que efetua o diagnóstico do sistema utilizando a teoria de cobertura parcimoniosa. As hipóteses de solução são formadas, confirmadas ou rejeitadas pelo mecanismo de inferência. Este conjunto de hipóteses é uma solução intermediária e denominada como “focus”. Uma vez finalizada esta etapa o operador intervém através da interface do usuário para avaliar qual hipótese das soluções contidas no “focus” é a mais provável. Como bem nos asseguram os autores, dado um conjunto de alarmes, se formam um conjunto de hipóteses com soluções candidatas, para explicar os alarmes através do motor de inferência. Portanto a metodologia exhibe um conjunto de hipóteses que podem elucidar o estado de operação do sistema elétrico. Estas são enumeradas segundo sua plausibilidade tal que o evento mais provável é listado primeiro.

Em Lee, Ahn e Park (2000), é desenvolvido um sistema especialista que usa como regras de conhecimento a topologia do sistema elétrico, as regras de operação dos dispositivos de proteção e o conhecimento heurístico dos operadores da operação do sistema. O mecanismo de inferência usado *backward-reasoning* encontra os conjuntos de hipóteses de solução. Conforme explicado acima a metodologia, portanto, tem que lidar com as incertezas inerentes ao problema de diagnóstico de faltas. Essa, porém, é uma tarefa que é resolvida atribuindo probabilidades de não atuação e falsa atuação de relés e disjuntores. Vê-se, pois, que essas probabilidades são fundamentadas em dados históricos do sistema o qual a metodologia é aplicada.

Por fim, podemos chegar à conclusão de que sistemas especialistas tornam-se uma escolha correta para resolver o problema de diagnóstico de falta. Logo, é indiscutível mencionar que apresentam algumas desvantagens, como problemas relativos à mudança de topologia da rede, o que implica na formulação de um grande número de regras, produzindo um grande consumo de tempo na fase de implementação.

As redes neurais artificiais (RNA) constituem uma forma de aproximação universal de funções que apresentam desempenho razoável durante a interpretação

e classificação de padrões complexos. Uma RNA é definida com base nas características do problema a ser resolvido, sendo esta treinada a partir de uma base de casos passados ou preparados como exemplos (conjunto de amostras de treinamento), de modo que a rede seja capaz de estimar situações futuras. (CARDOSO JR; ROLIM; ZÜRN, 2004).

O artigo de Yang, Chang e Huang (1994) propõe uma metodologia baseada em uma rede neural artificial para o diagnóstico de faltas, que se assemelha em estrutura a um sistema especialista. As amostras de alarmes de relés e disjuntores são fornecidas pelo operador especialista e, portanto, são compiladas e empregadas para treinar e construir a base de conhecimento denominada base tipo rede neural ou *NN-Type Knowledge Base*. As relações de seções com faltas com a atuação de suas proteções (primária, local ou remota) fornecem as amostras elementares. O mecanismo de inferência fornece a conclusão final do diagnóstico de falta juntamente com o nível de confiança desta conclusão através da exploração de informações fornecidas pela base de conhecimento.

No ano seguinte, Yang, Chang e Huang (1995), desenvolvem uma metodologia similar à proposta no ano anterior, adicionando um modelo chamado *Auxiliary Diagnosis Connectionists Model*. Este modelo é baseado em redes neurais e possui dois níveis hierárquicos. O primeiro nível resume-se em vários modelos conexionistas em que cada um é responsável pelo diagnóstico de uma seção em particular (ou seja, linha, barra ou transformador). O segundo nível é denominado *Synthesis Unit* responsável por fornecer o diagnóstico final considerando os resultados dos modelos do nível 1. A saída do nível 2, é utilizada tanto pelo motor de inferência como pela base de conhecimento, para elaborar um diagnóstico final do sistema.

Os resultados da metodologia, de acordo com o mencionado pelos autores são satisfatórios apresentando a vantagem de aprender novos cenários de faltas, bastando acrescentarem-se novos dados ao conjunto de treinamento, porém, padrões de treinamento dependem dos estados de relés e disjuntores, o que implica em um aumento do número de conexões da rede neural, dificultando a sua aplicação em sistemas de grande porte.

Rodriguez *et al.* (1996) propõem uma metodologia fundamentada em uma rede neural modular. Cada componente do sistema elétrico (linhas, barras ou

transformadores) é modelado como módulos ou centros de atividade. As entradas e saídas dos módulos são estabelecidas como os alarmes dos relés e são dependentes de qual modelo está sendo modelado. O treinamento das redes é feito independentemente para cada uma utilizando o algoritmo de treinamento *backpropagation*. O diagnóstico de faltas, para cada conjunto de alarmes, é executado pelas redes modulares através de geração de várias hipóteses e posterior justificativa dessas hipóteses para obter a melhor solução.

Uma metodologia baseada em redes neurais com memória associativa para diagnosticar faltas em subestações é proposta em Silva (ALVES DA SILVA *et al.*, 1996). A proposta considera duas categorias de redes: principais e secundárias. As redes principais utilizam como dados de entrada os alarmes de relés e disjuntores e são responsáveis pela fase faltosa. De acordo com os autores, as características que diferenciam a rede neural proposta das redes neurais tradicionais são: a capacidade de armazenar muitos pares de sinais/estímulos de maneira distribuída e robusta (altamente redundante); fornecer os sinais de resposta adequados no momento da recepção do estímulo associado; regenerar a resposta correta mesmo quando a entrada é alterada à memória existente.

O artigo de Souza *et al* (2001), propõe empregar classificadores neurais locais (*Local Neural Classifiers - LNC*), realizando o diagnóstico de faltas a partir de um sistema de transmissão monitorado separado em regiões. De acordo com os autores, utiliza-se redes do tipo *perceptron* multicamada e treinadas através de amostras obtidas artificialmente (experiência ou dados históricos). O diagnóstico conclui classificando as saídas da rede referentes ao estado da seção e considerando que os erros de classificação sejam minimizados.

Bi *et al.* (2002) apresentam o emprego de rede neural com função de base radial (*Radial Basis Function Neural Network-RBFNN*) para diagnosticar faltas em sistemas de transmissão. O algoritmo OLS (*Orthogonal Least Square*) é aplicado no treinamento da rede para otimizar o número de neurônios da camada oculta e determinar os pesos da rede. As amostras de treinamento são formadas por 40 casos de faltas específicos estabelecidos pelos autores. Para cada um dos casos, o estado dos disjuntores e relés (0 ou 1) são considerados como informações de entrada da rede e o estado das seções do sistema é considerado como saída da rede. Os autores

indicam um pequeno tempo necessário para o treinamento da rede (cerca de 1,54 s) o que não pode ser generalizado para sistemas reais de médio e grande porte, considerando que, a aplicação da metodologia é restrita a um sistema teste composto de 6 seções e 10 disjuntores.

Cardoso Junior, Rolim e Zürn (2004) apresentam a utilização de módulos de redes neurais dedicados para diagnosticar faltas em sistemas de transmissão. A metodologia constitui-se em estabelecer o local da falta em dois níveis distintos de análise: nível de equipamento e nível de sistema. O método considera o uso de redes neurais de regressão generalizada (*Generalized Regression Neural Network*) para combinar eventos. De acordo com os autores o método pode ser aplicado a sistemas elétricos de grande porte e consegue lidar com mudanças topológicas do sistema sem a necessidade de múltiplos treinamentos da rede neural.

Finalmente, Fonseca *et al.* (2013) desenvolvem uma metodologia para o diagnóstico de faltas baseada na conversão de alarmes em valores percentuais com o objetivo de alimentar redes neurais artificiais. O método permite que cada uma das RNA sejam treinadas e aplicadas às regiões do sistema elétrico. Conforme mencionado pelos autores, a RNA apresenta um pequeno tempo de treinamento. No entanto, em aplicações práticas, é necessária a obtenção de um número de padrões de treinamento e a necessidade de treinar novamente a rede quando houver mudança na topologia do sistema elétrico.

Por fim, podemos chegar à conclusão de que as RNAs são um método válido para o diagnóstico de falta, aliás, podem apresentar vantagens como a apreensão automática de novos cenários de faltas, (basta adicionar novos dados para o treinamento); não necessitam de regras explícitas para descrição do esquema de proteção. É preciso ressaltar que esta técnica apresenta entre suas principais desvantagens: padrões dependem dos estados dos relés e disjuntores, o que implica em um aumento do número de conexões da rede neural, dificultando a sua aplicação em sistemas reais de grande porte.

Redes de Petri (RP) são redes com ponderações nas relações de fluxo, sendo definido o elemento s como lugar (pode interpretar-se como uma restrição, um estado parcial, entre outros). Com o emprego da rede de Petri comumente consegue-se

representar por grafos compostos de nós lugares e nós transições t . Estes nós são ligados por um ou mais arcos.

Dentre as primeiras metodologias desenvolvidas empregando Redes de Petri para a solução do problema destaca-se o trabalho dos autores Lo, Ng e Trecat (1997). Neste artigo é proposta a modelagem do sistema de proteção, sendo os elementos s (lugar) formados por nós (isto é, linha e barras), relés e disjuntores, e os elementos de transição t produzidos pela transição da falta e o período de tempo de atuação dos relés (tempo entre o momento que o relé é sensibilizado pela corrente de falta e envia o sinal de *trip* ao disjuntor). O procedimento de estimar as seções em falta através da rede de Petri é executado de forma reversa (*backward Petri net*), quer dizer, iniciando-se dos nós finais da rede (marcação dos nós finais utilizando a atuação de disjuntores), transitando para os nós intermediários (relés atuados) até os nós iniciais (seções que causaram a atuação de relés e por consequência abertura de disjuntores).

Em um segundo artigo, Lo *et al.* (1999) propõem uma extensão (aumento da camada intermediária) das redes de Petri proposta em Lo, Ng e Trecat (1997) de forma a considerar a proteção de retaguarda bem como a primária. A metodologia é aplicada para a localização de faltas em subestações onde existem mais do que uma “camada” de proteção (proteção primária ou secundária). O processo de diagnóstico de faltas utilizando a rede é efetuado identicamente ao do trabalho anterior dos autores (*backward Petri net*).

Huang *et al.* (2000) desenvolveram uma nova rede de Petri baseada em esquemas de representação de conhecimento prático e regras heurísticas obtidas através de operadores do sistema elétrico para aplicação em subestações. Os vãos da subestação são divididos em quatro classes (barras, alimentadores, transformadores e linhas de transmissão) e modelos de redes de Petri são propostos para diagnosticar faltas em cada uma das classes. Algumas considerações feitas pelos autores para o desenvolvimento do modelo são: (1) as informações de relés e disjuntores são corretas e completas; (2) somente um relé ou um disjuntor pode falhar ao mesmo tempo; (3) nenhum disjuntor está fora de serviço devido a manutenção e (4) nenhum relé atua sem existir uma falta. Os autores propõem transformar as redes

de Petri na forma matricial para então serem invocadas para inferir o resultado do diagnóstico através de operações matriciais.

Sendo assim, devido as características das redes de Petri podemos perceber conforme os trabalhos citados que elas podem ser consideradas como uma ferramenta gráfica com capacidade para modelar e analisar sistemas de proteção. Entretanto, existem algumas questões que devem ser melhoradas, dentre elas: a incapacidade de generalização; a dificuldade do mapeamento de sistemas complexos; incapacidade dos modelos de produzir um diagnóstico correto, em casos em que os relés e disjuntores não estejam em boas condições.

As redes de Causa-Efeito ou (*Cause-Effect Network - CEN*) são estruturas constituídas de modelagem gráfica para explicação das causalidades entre duas variáveis. As variáveis são caracterizadas por nós na CEN, isto é, o nó causa e o nó efeito. Um arco dirigido do nó causa para o nó efeito é considerado se eles têm vínculo de causalidade.

Chen, Liu e Tsai (2001) propõem um método que utiliza uma CEN equivalente à proposta em Chen, Liu e Tsai (2000) para diagnosticar faltas em subestações. Um mecanismo de inferência baseado na transformação da CEN em uma forma matricial é proposto para estimar as seções no sistema que estão sob falta.

Chen, Tsai e Lin (2011) propõem um método baseado em CEN para sistemas de transmissão. A lógica de atuação do sistema de proteção é modelada através da CEN e os autores propõem transformar a CEN em matrizes (vetor verdade T , vetor nó de falta F e matriz de regras R) identificando a seção sob falta através de operações matriciais. As seções sob falta são identificadas através das entradas iguais a 1, contidas no vetor T^* que é obtido através da transformação de T utilizando a matriz de regras R . A rede CEN deve ser modelada conforme a topologia da rede, sendo impraticável a elaboração manual da rede para um sistema de grande porte.

Chen (2011) propõe um método baseado em CEN e lógica fuzzy para o diagnóstico de faltas em subestações de distribuição. A atuação do sistema de proteção é modelada através da CEN e a relação de causa e efeito entre seções de falta, atuação de relés e disjuntores é considerada através de *membership functions* que levam em conta o fator de certeza de atuação da proteção (obtida através de dados históricos). Para a realização do diagnóstico, os autores propõem uma

transformação matricial da CEN utilizando regras *fuzzy*. Ainda assim, a modelagem das funções de pertinência da lógica *fuzzy* é uma desvantagem para a implementação prática desse método dada a necessidade de conhecimento extraído de dados históricos, experiência ou tentativa e erro.

Por outro lado, a lógica Nebulosa ou Lógica *fuzzy* consiste em aproximar a decisão computacional à decisão humana. A lógica *fuzzy* possui suporte na criação de modelos completos e eficientes, capazes de representar as incertezas e imprecisões do raciocínio humano, sendo assim, as variáveis linguísticas associadas às funções de pertinência são empregadas.

Min *et al.* (2004) utilizam uma matriz tridimensional (3D) para representar a topologia da rede de transmissão e o comportamento do sistema de proteção. A matriz é composta de quatro camadas: camada de topologia, camada de disjuntores e três camadas para representar os três estágios de atuação (camadas) da proteção (principal, secundário e terciário). Assim como em Souza *et al.* (2004) as relações *fuzzy* inerentes às incertezas da proteção são representadas utilizando diagramas sagitais. Os autores assumem que não há incertezas entre as operações dos relés e disjuntores (sempre haverá operação de um disjuntor quando da atuação de um relé). No processo de diagnóstico um método de união *fuzzy* (*Yager class*) é aplicada à matriz 3D para examinar as relações entre os dispositivos atuados e as seções candidatas para estarem sob falta. Aquelas seções que apresentarem uma união *fuzzy* superior a 0,8189 são consideradas sob falta.

Luo e Kezunovic (2008) propõem o uso de redes de Petri com raciocínio *fuzzy* (*Fuzzy Reasoning Petri-Nets - FRPN*) para aplicação em sistemas de transmissão. As regras *fuzzy* são adotadas nos nós de transição da rede de Petri, considerando a confiabilidade de atuação da proteção primária, secundária e terciária dos relés utilizando os parâmetros de confiabilidade dos relés (baseado em experiência). A rede proposta é do tipo *backward Petri net*. Os autores propõem um algoritmo de execução de matrizes para transformar o mapeamento gráfico das redes em matrizes e executar o diagnóstico de faltas através de operações matriciais.

A lógica *fuzzy* proporciona um meio conveniente para inexistência de modelagens e incertezas, portanto é um método de solução poderoso para ser aplicado, pois considera a imprecisão de dados incompletos. A desvantagem é a

necessidade de se obter dados empíricos que ajudam a determinar os membros da função e as variáveis *fuzzy*.

De maneira geral, os métodos de otimização podem ser divididos em dois tipos de algoritmos: exatos e heurísticos. A diferença elementar entre ambos reside no fato de que técnicas de otimização clássica, podem ser consideradas mais vantajosa pela garantia de obter soluções de melhor qualidade do problema. As meta-heurísticas não possuem essa garantia, e por esse motivo não necessariamente retornam uma solução ótima.

As técnicas meta-heurísticas são importantes na resolução de problemas de alta explosão combinatória, basicamente quando esses problemas não podem ser resolvidos eficientemente por técnicas exatas. Dentre as vantagens mais importantes das meta-heurísticas é que elas na maioria dos casos podem encontrar soluções de boa qualidade com um esforço computacional baixo e não exigem a modelagem matemática completa do problema.

Desde a publicação do artigo de Wen et. al. (1995) diversos métodos empregando novas meta-heurísticas foram publicados para resolução do problema de diagnóstico de faltas. Geralmente, de acordo com os autores dos trabalhos, os métodos fornecem soluções de boa qualidade, porém, não garantem a solução ótima global.

A metodologia proposta por Lin *et al.* (2010) envolve a combinação das vantagens de duas meta-heurísticas bem estabelecidas na literatura: a habilidade dos algoritmos genéticos em obter boas soluções iniciais durante a busca global, e o bom desempenho da busca tabu no refinamento da solução na busca local. Os algoritmos genéticos foram introduzidos por Holland (1975) e imitam os princípios básicos da reprodução e seleção natural de indivíduos, possibilitando trabalhar simultaneamente com um conjunto de soluções possíveis (população). A Busca Tabu, conhecida na literatura inglesa como Tabu Search, é um método de otimização para busca local originada nos trabalhos de Glover (1986), cujo funcionamento se baseia na busca em vizinhança até que critérios de parada sejam satisfeitos. Através de resultados comparativos com um algoritmo tradicional, o método de Lin *et al.* (2010) obteve desempenho superior considerando o tempo médio de convergência para cenários com múltiplas faltas simultâneas.

Bedekar, Bhide e Kale (2011) apresentaram uma metodologia para estimação de seção em falta por meio das redes neurais com treinamento baseado na regra de Hebb e algoritmo genético com parâmetros contínuos. A regra de Hebb é utilizada para definir os pesos da função objetivo com base nos padrões de funcionamento da proteção do sistema de potência, enquanto o algoritmo genético contínuo é aplicado para resolver a formulação matemática utilizando os alarmes relatados de disjuntores e relés de proteção. Para treinar a rede neural, os autores determinaram, de maneira heurística, que o número de padrões necessários é equivalente ao dobro do número de seções existentes na rede elétrica.

Muitas meta-heurísticas inspiradas em diversos processos naturais têm sido desenvolvidas e aplicadas para a resolução do problema de diagnóstico de falta. Essa linha de pesquisa é conhecida como computação bioinspirada. O enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) é empregado por He *et al* (2009) para resolver uma reformulação do modelo utilizado por Wen, Chang e Srinivasan (1995). A proposta consiste na inclusão de eventos de religamento e falha da proteção de disjuntores na função objetivo. No total, existem sete grupos de variáveis de decisão classificadas de acordo com a função de proteção específica: proteção principal; proteção de retaguarda local; proteção de retaguarda remota; religamento instantâneo; religamento temporizado; proteção contra falha de disjuntor; e estado de disjuntores. São utilizados pesos para classificar o grau de importância de cada variável de decisão, além de um fator de penalização relativo ao mau funcionamento de relés e disjuntores.

O algoritmo baseado em sistemas imunológicos artificiais foi utilizado por Leão, Pereira e Mantovani (2010) para a localização de faltas em sistemas de energia elétrica. No trabalho é desenvolvido um modelo matemático composto pelas relações lógicas dos estados esperados dos dispositivos de controle e proteção e pelo modelo de programação binária irrestrita (*UBP*). O modelo lógico de atuação do sistema de proteção é empregado em todos os relés instalados no sistema e dependem da topologia do sistema e da filosofia de proteção empregada em cada equipamento da rede. O modelo de programação binária irrestrita é formulado utilizando a teoria de cobertura parcimoniosa sendo que a função objetivo mede a afinidade entre os anticorpos (estados esperados de relés e disjuntores) e o antígeno (alarmes

reportados). O algoritmo imunológico é empregado para buscar a solução mínima do problema em cada geração.

Huang *et al.* (2013) propuseram uma metodologia híbrida composta de uma otimização de acasalamento de abelhas (*HBM*, do inglês *Honey-Bee Mating Optimization*) e um algoritmo de simulação do crescimento de uma planta (*ASCP*) para resolução do modelo *UBP* (*Unconstrained Binary Programming model*) proposto por Leão, Pereira e Mantovani (2010). O algoritmo HBM funciona da seguinte maneira: a rainha (solução corrente) voa até encontrar um zangão no ar (seção em falta) para acasalar. O processo de acasalamento é avaliado de acordo com probabilidade do cruzamento do zangão e a velocidade de voo da abelha. Quando houver o cruzamento, se um indivíduo da prole possuir melhor material genético que a rainha (melhor função de avaliação), a coroa é repassada para este indivíduo, caso contrário, o indivíduo se torna um novo zangão. A seguir, o algoritmo *ASCP* (Algoritmo de simulação do crescimento de uma planta) analisa as fases de crescimento de uma planta (raiz, caule e folhas) de forma a caracterizar uma busca local por melhores soluções. Em um estudo comparativo com outras meta-heurísticas, a técnica obteve resultados mais precisos com melhor velocidade de convergência. Futuros estudos nessa linha de pesquisa devem se preocupar em desenvolver uma metodologia para ajuste dos parâmetros da técnica. Além disso, é fundamental analisar a aplicabilidade em sistemas reais que possuem lógicas de proteção mais complexas que as demonstradas no trabalho.

Leão, Pereira e Mantovani (2014) apresentaram uma nova proposta composta de equacionamento do funcionamento das proteções e um modelo de *UBP* estendido para subestações de distribuição de energia elétrica. A atuação de cada relé é avaliada a partir dos alarmes de relés e disjuntores reportados, por meio de uma equação específica para cada função de proteção. A grande complexidade de cada equação requer um estudo pontual no sistema de potência e vasto conhecimento de pessoal especializado, fatos que podem limitar uma possível aplicação prática. O modelo *UBP* é resolvido através de um algoritmo genético adaptativo (*AGA*), o qual se diferencia do algoritmo genético tradicional por possuir apenas dois parâmetros a serem ajustados, enquanto os demais são ajustados automaticamente. A metodologia apresenta resultados satisfatórios, apesar da ausência de um estudo mais aprofundado sobre o impacto dos pesos da *FO* no diagnóstico. Além disso, os

resultados apresentados mostram que a solução do AGA tende a variar bastante devido à diversificação populacional.

Huang e Liu (2015) empregaram a meta-heurística bioinspirada baseada em biogeografia (*BBO*, do inglês *Biogeography-Based Optimization*) para resolver o modelo UBP proposto por Leão, Pereira e Mantovani (2010). A abstração de processos presentes na ciência da biogeografia é utilizada para formalizar uma estrutura computacional capaz de inferir a história biogeográfica de linhagens através da reconstrução dos eventos que motivaram a migração de espécies de um habitat para outro.

Segundo Blum e Roli (2003), desenvolver um método exato eficiente não é uma tarefa trivial, inclusive para problemas relativamente fáceis. Esse fator, aliado à impraticabilidade da busca exaustiva, dentro de um tempo hábil, tornam atrativo o desenvolvimento de heurísticas para a resolução de problemas combinatórios em tempo real. No entanto, a maior desvantagem das meta-heurísticas na literatura é a necessidade de calibrar quantidade elevada de parâmetros que é realizada através de tentativa e erro. Ainda assim a calibração, mesmo que feita de forma exaustiva, não pode garantir a melhor solução para todos os casos de falta.

Nos anos recentes foram desenvolvidas metodologias baseadas em otimização exata como a metodologia proposta por Fritzen *et al.* (2012). Este método consiste em determinar a seção em falta em dois níveis distintos de análise. A primeira parte da metodologia consiste no desenvolvimento de uma heurística construtiva que processa os alarmes informados pelo sistema SCADA utilizando padrões de eventos caracterizados pelos estados esperados das funções de proteção do sistema. Na segunda parte a metodologia consiste em um modelo de programação inteira binária, formulado usando as informações processadas pela heurística construtiva junto com os estados dos disjuntores para fazer um diagnóstico correto dos estados das seções do sistema. A metodologia descrita pelos autores, porém, apresenta algumas desvantagens importantes a destacar como: um método em dois níveis pode convergir em um mínimo local da função de avaliação, devido a classificação de eventos; requer a elaboração de padrões de funcionamento dos sistemas de proteção e portanto a mudança topológica do sistema implica na mudança do conjunto de padrões.

Outra metodologia semelhante é proposta em Oliveira *et al*, (2016), possuindo duas partes; a primeira classifica os eventos de seções envolvidas em uma anormalidade apresentada no sistema, de acordo com a filosofia de proteção adotada; seguidamente um modelo de otimização faz a análise dos alarmes informados e faz o diagnóstico da seção em falta. A classificação dos eventos é baseada no teorema de Bayes e tem como objetivo validar a operação de cada sistema de proteção, classificando o evento como normal ou com defeito. Na segunda etapa um modelo de programação inteira mista baseado no conjunto das coberturas parcimoniosas combina as classificações dos eventos processados previamente com os estados dos disjuntores para diagnosticar a seção ou equipamento que está funcionando incorretamente. Assim, esta abordagem pelo teorema de Bayes, pode não ser boa para aplicações de ordem prática, devido as dificuldades de se obter as informações ou os dados probabilísticos sobre as falhas e operação dos equipamentos de proteção.

D. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as características principais do problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica, os conceitos básicos da proteção dos equipamentos do sistema elétrico de transmissão, a fim de ter uma ideia mais clara na formulação matemática do problema.

Para resolver este problema, diversas metodologias foram empregadas desde técnicas de solução baseadas em heurísticas e meta-heurísticas sendo que cada umas de suas vantagens e dificuldades foram discutidas neste capítulo. Poucos trabalhos abordam a resolução do problema de diagnóstico de faltas através de técnicas de otimização clássica. Identificou-se que essa área de pesquisa ainda não é muito explorada na literatura especializada. Neste trabalho é abordado o problema de diagnóstico de faltas como um problema não linear inteiro binário, o qual é transformado em um modelo linear através da linearização de algumas expressões, portanto originando outro modelo de otimização com as mesmas características. Este problema resultante é composto por uma função objetivo linear, restrições lineares, e portanto o problema de otimização não linear é abordado como um problema linear inteiro binário.

3 TEORIA DE COBERTURA PARCIMONIOSA

Neste capítulo apresentam-se os conceitos básicos da teoria de cobertura parcimoniosa. Pretende-se a partir da teoria explicar, contextualizar e formalizar o problema de diagnóstico de faltas. Trata-se de um capítulo fundamental pois, fornece o embasamento teórico para a sustentação do modelo matemático proposto para o diagnóstico de faltas em sistemas de potência.

A. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Diagnosticar a condição de determinado sistema quando alguma coisa está errada através de um sistema natural (ser humano) ou um sistema desenvolvido por este último pode ser difícil. Em muitas áreas, tais como medicina e eletricidade, um longo período de treinamento e aperfeiçoamento é necessário para que um indivíduo possa tornar-se um hábil diagnosticador. Durante este tempo, um diagnosticador sem experiência deve assimilar uma grande quantidade de informações a respeito do sistema a ser monitorado e diagnosticado.

Além disso, um diagnosticador sem experiência não é realmente ensinado como raciocinar utilizando o conhecimento passado a ele na fase de treinamento de modo a chegar a uma conclusão ou diagnóstico, exceto talvez implicitamente através de exemplos de casos. Este fato indica que muitos dos aspectos essenciais da relação raciocínio-diagnóstico são similares a um tipo de intuição¹ ou raciocínio de senso comum.

Mais precisamente, a relação raciocínio-diagnóstico ou em outras palavras, o raciocínio usado para determinar um diagnóstico, pode ser classificado como um tipo de conhecimento de inferência assim abordado em Peng e Reggia (1990), conhecido como raciocínio abduativo ou abdução².(LEÃO, 2011)

¹ Intuição em filosofia é definida como o processo de apreensão racional não discursiva que se caracteriza por um processo paulatino que finaliza em uma conclusão, a intuição é compreensão direta, imediata de algo.

² Abdução é denominado por Aristóteles como qualquer raciocínio, cuja conclusão é somente provável. É um processo de prova indireta, semi-demostrativa, em que a premissa maior é evidente,

Do ponto de vista filosófico e lógico a abdução pode ser definida como um processo de geração de explicações plausíveis para um dado conjunto de observações ou fatos. Embora mencionado no trabalho de Aristóteles, o estudo de aspectos formais de abdução não iniciou até cerca de um século atrás. A emergência de modelos computacionais para várias aplicações de inferência abdutiva em inteligência artificial e ciência cognitiva é mais recente, iniciando-se a um pouco mais de duas décadas atrás (PENG; REGGIA, 1990).

A teoria conhecida como *parsimonious set covering theory* desenvolvida em Peng e Reggia (1990) captura de forma precisa muitas das importantes características do conceito intuitivo de abdução. Ela não somente forma uma boa fundamentação teórica para resolução de problemas através de diagnóstico automático, mas também fornece um modelo útil para o estudo de outras aplicações não diagnosticáveis caracterizadas como problemas abduativos.

B. ABDUÇÃO E DIAGNÓSTICO POR INFERÊNCIA

Em termos informais, abdução ou inferência abdutiva tem o significado de “inferir a melhor ou mais plausível explicação para um dado conjunto de fatos” (PENG; REGGIA, 1990). Abdução, dedução, e indução são três lógicas fundamentais de raciocínio.

Abdução é mais frequentemente usada no raciocínio de “senso comum” aplicado às tarefas diárias e também na resolução de problemas com alto grau de especialidade. De fato, uma avaliação superficial de conclusões alcançadas utilizando raciocínio abduativo são frequentemente vistas como inferência dedutiva. “Elementar, meu caro Watson”, diz Sherlock Holmes, o mestre da “dedução”, quando ele faz uma de suas brilhantes inferências abduativas.

Os autores Peng e Reggia (1990) encontraram diversos casos sugerindo que conclusões alcançadas utilizando raciocínio abduativo foram de fato alcançadas através de dedução. Por exemplo, “Eu deduzo que a bateria de meu carro está descarregada porque o motor não funciona e as luzes não acendem.” Neste caso, a

no entanto, a menor é só provável ou de qualquer forma mais facilmente aceita pelo interlocutor do que a conclusão que se quer demonstrar.

bateria pode estar descarregada e esta é certamente a explicação mais plausível para o fato ocorrido. Entretanto, não se pode “deduzir” tal conclusão nesta situação. A realidade pode ser que ambos, os faróis estejam queimados e simultaneamente o combustível acabou. Desta forma, pode ser observado que a primeira hipótese ou explicação é mais plausível, consistindo somente de um problema (bateria descarregada) em vez de cinco (quatro luzes queimadas e falta de combustível). Mas o interessante é que não se pode deduzir qualquer coisa com certeza, considerando a situação mencionada. O ideal, então, é considerar a bateria descarregada como uma hipótese plausível entre outras possíveis hipóteses, para ser subsequentemente testada e validada. A abdução não envolve somente criar hipóteses, mas também discriminá-las baseado em suas plausibilidades contextualizadas pelo problema a ser resolvido.

Para demonstrar as características da inferência abductiva, é necessário compará-la com dedução e indução através de exemplos simples.

Raciocínio dedutivo consiste de uma Regra geral (premissa maior) e um Caso específico (premissa menor) a partir do qual um Resultado específico (conclusão) pode ser deduzido:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Regra} \Rightarrow \text{Todas as bolas dentro da caixa são pretas} \\ + \text{Caso} \Rightarrow \text{Elas bolas são da caixa} \\ \hline \text{Resultado} \Rightarrow \text{Elas são pretas} \end{array} \right\} \text{Dedução}$$

Por outro lado *raciocínio indutivo*, consiste de um caso e um resultado específico a partir dos quais uma regra geral pode gerar uma hipótese.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Caso} \Rightarrow \text{Elas bolas são da caixa} \\ + \text{Resultado} \Rightarrow \text{Elas são pretas} \\ \hline \text{Regra Hipotetizada} \Rightarrow \text{Todas as bolas dentro da caixa são pretas} \end{array} \right\} \text{Indução}$$

Em contraste a dedução e indução, o *raciocínio abductivo* consiste de uma regra geral e um resultado específico a partir dos quais um caso específico pode gerar uma hipótese:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Regra} \Rightarrow \text{Todas as bolas dentro da caixa são pretas} \\ + \text{Resultado} \Rightarrow \text{Estas são pretas} \\ \hline \text{Caso Hipotetizado} \Rightarrow \text{Estas bolas são da caixa} \end{array} \right\} \text{Abdução}$$

Indução, assim como abdução, envolve criar e testar hipóteses. De fato, o termo indução é algumas vezes usado para descrever um processo de inferência que inclui inferência abdutiva. A diferença entre estes dois termos deve ser clara a partir dos exemplos anteriormente citados. Na indução o que está sendo hipotetizado é a regra geral, enquanto na abdução é o caso específico. Além disso, uma hipótese indutiva é usualmente feita não a partir de uma única situação, mas a partir de um grande número de situações que coletivamente dão suporte à plausibilidade da regra geral hipotetizada. Inferência abdutiva pode ser e, usualmente, é conduzida através de informações acerca de uma única situação.

Inferência dedutiva, por outro lado, é similar á abdução no sentido de que um resultado é produzido para um caso específico. Em dedução, contudo, o resultado é uma consequência lógica da regra geral e o caso, que é mantido verdadeiro. Se ambos, regra e caso, são verdadeiros, então o resultado é também verdadeiro. Em contraste com abdução, mesmo se ambos, a regra geral (conhecimento) e o resultado específico (fatos observados) são verdadeiros, o caso específico inferido é somente uma possibilidade; ele não é definitivamente uma verdade. No exemplo de abdução acima, as bolas pretas observadas podem vir de algum outro objeto diferente da caixa considerada. Além disso, se a regra geral não é uma implicação absoluta, mas uma asserção como “Quase todas as bolas da caixa são pretas”, então nem mesmo o resultado da dedução se mantém verdadeiro. Assim, não é possível inferir através de dedução pura a partir do caso “Estas bolas são da caixa” a conclusão “Estas bolas são pretas”. Isto é porque muitos sistemas baseados em regras, como sistemas especialistas, têm adotado várias medidas de incertezas, mesmo quando eles são dedutivos por natureza (LEE; AHN; PARK, 2000). Por outro lado, em abdução, mesmo quando a regra geral não apresenta implicação absoluta, “Estas bolas são da caixa” é ainda uma possível explicação do fato observado “Estas bolas são pretas”.

Frequentemente, mais do que uma explicação possível existe durante a inferência abdutiva, de modo que um processo de diferenciação de hipóteses é necessário para discriminar entre explicações alternativas.

C. PROBLEMAS DE DIAGNÓSTICO: DEFINIÇÃO E RESOLUÇÃO

O fundamento de um problema de diagnóstico é explicar a presença de um dado conjunto de manifestações (sintomas, alarmes, etc.) utilizando, de alguma forma, o conhecimento adquirido. Problemas de diagnóstico podem ser encontrados em várias áreas do conhecimento, por exemplo, diagnóstico em medicina clínica, diagnóstico de falhas/defeitos em diversos sistemas, entre outros.

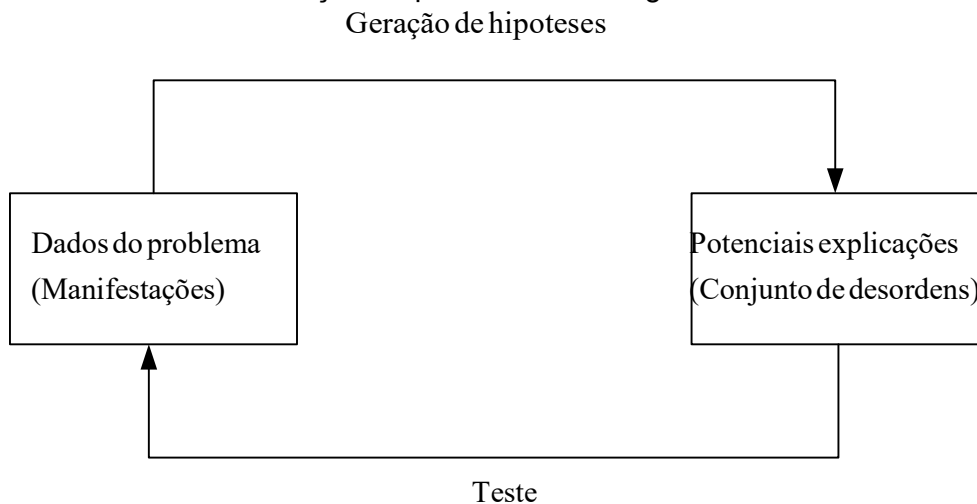
É largamente aceito que a inferência do diagnóstico humano se enquadra naturalmente na categoria de abdução (PENG; REGGIA, 1990; POPLE, 1973). Considere o diagnóstico médico como um exemplo. Livros médicos apresentam associações entre doenças e manifestações na forma de “doença (ou desordem) d_i pode causar os sintomas (manifestações) m_1, m_2, \dots, m_k ”. Se um conjunto de sintomas ou manifestações é encontrado em determinado paciente, o médico tenta identificar um conjunto de uma ou mais doenças (geração de hipóteses) que é capaz de causar essas manifestações (ou pelo menos a mais significativa delas), e assim, obter uma explicação para tais sintomas. Para selecionar a hipótese mais plausível entre aquelas geradas o médico utiliza algum critério informal de plausibilidade, probabilidade ou informações contextuais (idade do paciente, inter-relações entre doenças, etc.). Se a hipótese resultante não é suficiente para convencê-lo, algumas questões podem ser feitas ao paciente ou exames clínicos são efetuados para permitir informações adicionais. Baseado neste exemplo, pode-se concluir que o raciocínio humano para o diagnóstico frequentemente envolve um ciclo de geração-teste de hipóteses (PENG; REGGIA, 1990) :

- a) Geração de hipótese ou invocação de desordem: os candidatos à explicação das manifestações são gerados. Um conjunto de elementos individuais de hipóteses (desordens) é invocado através de associações com a mais nova manifestação;
- b) Atualização ou formação de hipóteses: atualização das hipóteses geradas ou a combinação das hipóteses geradas em a), com hipóteses previamente geradas para a formação de novas hipóteses tal que cada hipótese possa explicar velhas e novas manifestações;

- c) Teste de hipóteses ou geração de questões: fase em que uma nova questão é gerada cuja resposta possa ser usada para testar e para remover a ambiguidade entre as hipóteses geradas.

O ciclo geração-teste de hipóteses (Figura 2) continua até que a plausibilidade de uma ou mais hipóteses sejam aceitas utilizando algum critério e assim possam constituir explicações razoáveis (diagnóstico) para dadas manifestações.

Figura 2 Ciclo de geração-teste de hipóteses para o raciocínio humano durante a resolução de problemas de diagnóstico



Fonte: Peng e Reggia (1990).

A geração de hipóteses é equivalente à recuperação de informações de desordens causativas a partir da memória de longo prazo³, no momento em que o diagnosticador detecta uma nova manifestação. Esta invocação de potenciais causas para as manifestações inicia-se logo no início do processo de diagnóstico e traça na memória do diagnosticador as associações causais entre as desordens e suas manifestações. Idealmente, a base de conhecimento do diagnosticador ou memória de longo prazo inclui um conjunto de todas as possíveis desordens causativas para cada manifestação e o conjunto de todas as possíveis manifestações para cada desordem. Geralmente, uma única manifestação é responsável por invocar novas desordens para a incorporação no ciclo da Figura 2.

³ Memória que é capaz de recuperar eventos, informações que ocorreram ou foram adquiridas em um passado distante.

A segunda fase do ciclo de geração-teste b), envolve a incorporação de possíveis causas de novas manifestações na hipótese sob consideração. Isto pode requerer atribuição de manifestações para algumas desordens já assumidas, ou adicionar novas desordens invocadas através das manifestações para formar nova hipótese. Em outras palavras, o conjunto de hipóteses plausíveis é continuamente mudado durante o processo. Uma determinada hipótese alcançada, às vezes, pode tornar-se relativamente complexa. Não somente pode conter um grande grau de incerteza sobre quais desordens podem explicar certas manifestações, mas também pode presumir a presença simultânea de múltiplas desordens. Outra observação é que durante o processo dinâmico ilustrado na Figura 2, diagnosticadores humanos tendem a focarem suas atenções somente em hipóteses mais promissoras enquanto as demais são colocadas em segundo plano, mas não completamente esquecidas. Mais tarde no processo, se alguma nova manifestação torna-se aparente, as hipóteses em segundo plano podem ser reconsideradas. Em outras palavras, diagnosticadores humanos adotam alguma forma de estratégia de busca para reduzir seu espaço de busca.(LEÃO, 2011)

Segundo Peng e Reggia (1990), evidências empíricas sugerem que a formação de hipóteses pode ser mais bem vista através da resolução de dois objetivos conflitantes:

- *Cobertura*: o objetivo de explicar todas as manifestações que estão presentes;
- *Parcimônia*: o objetivo de minimizar a complexidade das explicações.

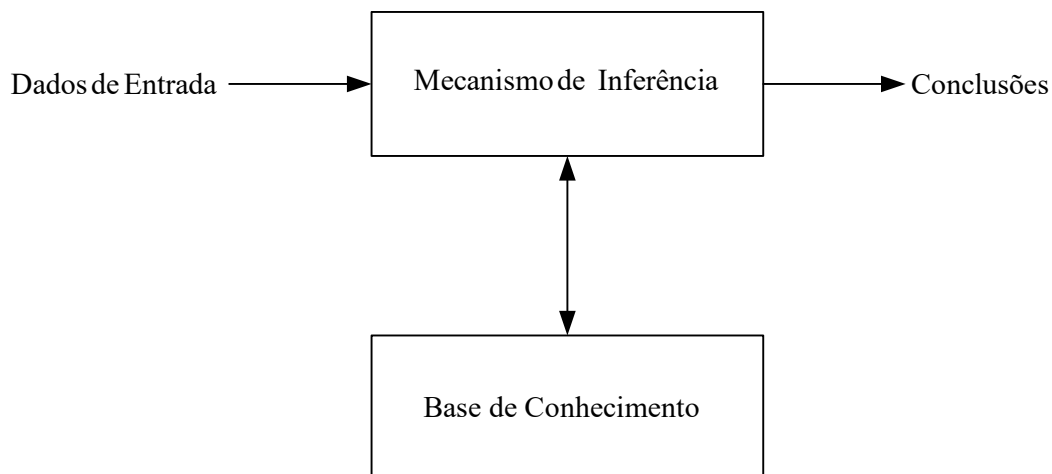
1.1.4 Modelos Computacionais para Resolução de Problemas de Diagnóstico

Dentre diversos modelos e técnicas dedicadas à resolução de problemas de diagnóstico, Venkatasubramanian, Rengaswamy e Kavuri (VENKATASUBRAMANIAN *et al.*, 2003) e Venkatasubramanian, Rengaswamy e Kavuri (2003b), e em particular o diagnóstico de faltas em sistemas de energia elétrica (capítulo 2), são apresentados aqui dois dos principais métodos baseados em modelos utilizados para representar o processo de raciocínio no diagnóstico: modelos que usam uma base de conhecimento “*knowledge-based models*” ou também conhecidos como sistemas especialistas e modelos abduativos baseados em associação “*association-based abductive models*”.

Sistemas de diagnóstico baseados em SEs apresentam como característica uma separação entre a base de conhecimento e o mecanismo de inferência. O conhecimento do sistema, abstraído do conhecimento humano sobre o problema, é contido na base de conhecimento. O mecanismo de inferência usa informações da base de conhecimento para formar conclusões sobre os dados de entrada (Figura 3).

Sistemas especialistas apresentam inúmeros problemas fundamentais que devem ser resolvidos antes de seu desenvolvimento e aplicação. Dentre alguns destes problemas, incluem-se: 1) representação do conhecimento (que tipo de representação é melhor para armazenar o conhecimento); 2) aquisição do conhecimento (como adquirir habilidades a partir do conhecimento de especialistas humanos); 3) modelos de raciocínio (qual tipo de mecanismo de inferência deve ser usado); e, 4) justificativa das conclusões (como justificar as conclusões do sistema de maneira inteligível para o usuário). Soluções para esses problemas são interdependentes e variam dependendo da aplicação. Apesar de vários artigos na literatura especializada (Seção 2c) desenvolverem SEs aplicados ao diagnóstico de faltas, esse tipo de modelo computacional ainda apresenta diversas desvantagens quando comparado a outras técnicas.(LEÃO, 2011)

Figura 3 Modelo simples de SE.



Fonte: Peng e Reggia (1990).

Por outro lado, modelos abduativos baseados em associação são representados por redes associativas ou semânticas que consistem de *nós*, representando entidades tais como objetos, conceitos, eventos e *conexões (links)* entre os nós, representando as inter-relações ou *associações* (conhecimento) entre

nós. Desta forma, enquanto SEs utilizam o conhecimento contido em uma base bem definida, modelos baseados em associação representam o conhecimento implícito através das inter-relações ou conexões de causa e efeito entre nós. Devido suas características, redes associativas são particularmente adequadas para representação de associações causais entre desordens e manifestações como será mostrado a seguir.(LEÃO, 2011)

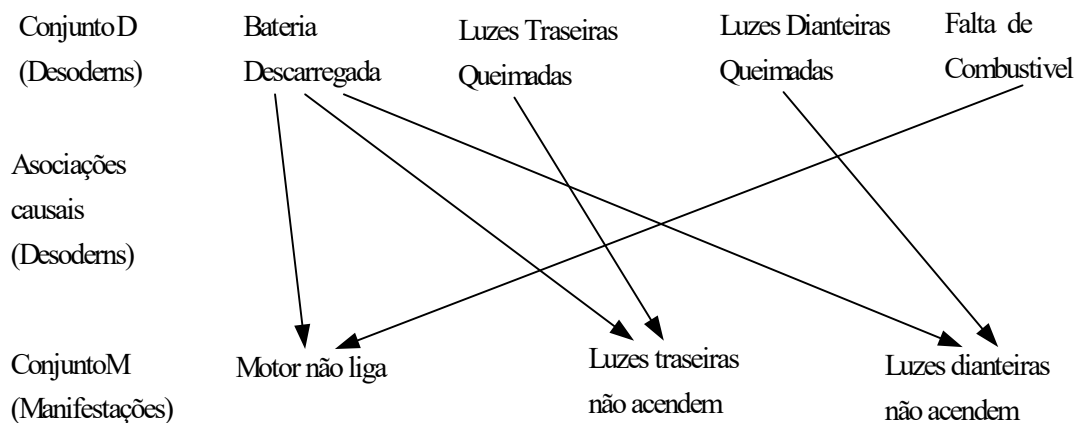
1.1.5 Formalização da Teoria de Cobertura Parcimoniosa

A teoria de cobertura parcimoniosa ou "*Parcimonious Set Covering Theory*" tem o objetivo de fornecer embasamento teórico para modelos abduativos baseados em associação.

Além disso, busca a formalização da natureza abdutiva no processo de raciocínio humano para obtenção de determinado diagnóstico. A teoria foi proposta por Reggia *et al.*(1985), e substancialmente expandida por Peng e Reggia (1986; 1990).

Antes da apresentação formal desta teoria, ideias básicas sobre como o conhecimento é utilizado, como é organizado e como a inferência é conduzida são apresentados baseado no exemplo apresentado na Seção b. As entidades, tais como, "o carro não liga" e "os faróis não acendem" são diretamente observáveis e são consideradas como *manifestações* na teoria de cobertura parcimoniosa e denotadas pelo conjunto M . Manifestações individuais são denotadas por m_j . As outras entidades envolvidas, tais como "bateria descarregada", "faróis queimados" e "falta de combustível", são consideradas como causas das manifestações ou em outras palavras, desordens, denotadas pelo conjunto D . Desordens individuais são denotadas por d_j (Figura 4).

Figura 4 Rede Causal para o diagnóstico da partida do motor.



Fonte: Peng e Reggia.

As associações causais mostradas pelas setas da Figura 4 são pares e tomam os sentidos a partir de desordens para manifestações. Cada desordem é assim associada com todas as manifestações que ela pode causar. A presença de uma manifestação pode invocar todas as desordens causativas através da rede causal (Figura 4). A palavra “invocar” então tem o significado de “sugerir possibilidades”. Por exemplo, “motor não liga” invoca duas possíveis desordens “bateria descarregada” e “falta de combustível”.

Quando a primeira manifestação “motor não liga” é detectada durante a resolução do problema de diagnóstico, as hipóteses iniciais seriam as duas desordens invocadas:

" bateria descarregada " ou " falta de combustível "

Cada uma destas duas hipóteses consiste de uma única desordem. Cada uma destas desordens é capaz de causar “motor não liga” e essas duas desordens são as únicas capazes de causar a manifestação inicialmente observada (conhecimento até o momento). Para a discriminação entre essas duas hipóteses, questões sobre a presença de outras manifestações podem ser feitas, tais como:

“As luzes acendem?”

Se ambas as luzes traseiras e dianteiras não acendem, então se têm duas novas manifestações que invocam cada uma delas o conjunto de desordens e suas respectivas causas.

Neste exemplo específico, a teoria de cobertura parcimoniosa geraria duas hipóteses ou explicações alternativas para as três manifestações:

“Bateria descarregada”

ou

“Falta de combustível” e

“Luzes dianteiras queimadas” e

“Luzes traseiras queimadas”

A plausibilidade destas duas hipóteses pode ser justificada como segue. Primeiro, cada hipótese *cobre* todas as três manifestações no sentido de que cada manifestação pode ser explicada através das desordens hipotetizadas. Segundo, cada hipótese é *parcimoniosa*, embora em diferentes sentidos. A primeira hipótese contém somente uma desordem e, portanto, apresenta a menor cobertura das três manifestações e assim chamada de *cobertura mínima*. A segunda hipótese contém três desordens e esta solução não parece parcimoniosa ou simples, especialmente quando comparada à primeira. Contudo, esta segunda hipótese é ainda parcimoniosa no sentido de que se for removida qualquer desordem da hipótese, a solução não será mais uma cobertura de todas as manifestações presentes. Tais hipóteses são chamadas de *coberturas irredundantes* porque elas contêm desordens não redundantes.

1.1.5.1 Formalização Matemática da Teoria de Cobertura Parcimoniosa

Baseado na noção intuitiva apresentada no exemplo da seção anterior, a teoria de cobertura parcimoniosa pode ser formalizada através da definição do seguinte conjunto de variáveis:

$$P = \langle D, M, C, M^+ \rangle \quad (1)$$

O conjunto P define o domínio do problema onde o processo de diagnóstico é conduzido, sendo:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (2)$$

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\} \quad (3)$$

$$C \subseteq D \times M \quad (4)$$

$$M^+ \subseteq M \quad (5)$$

Sendo:

D : Conjunto finito e não vazio de objetos denominados desordens;

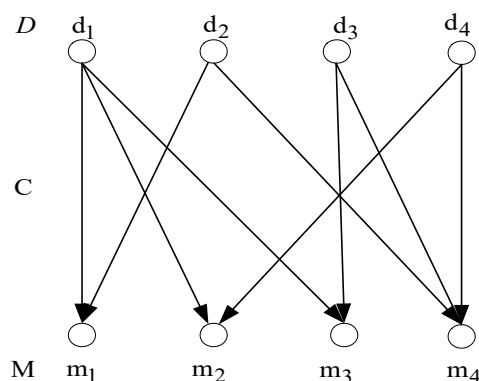
M : Conjunto finito e não vazio de objetos denominados manifestações;

C : Representa a relação com *domínio* $(C)=D$ e *imagem* $(C)=M$, denominado conjunto causa;

M^+ : É um subconjunto de M contendo as manifestações presentes e observáveis.

A relação C dada pela equação (4) define a noção intuitiva de associações causais na forma simbólica, onde $\langle d_i, m_j \rangle \in C$ se e somente se “a desordem d_i pode causar a manifestação m_j ”. Na Figura 5 é ilustrado graficamente o conhecimento causal simbólico representado pelo conjunto C para um problema genérico.

Figura 5 Rede causal para um problema genérico.



Fonte: Peng e Reggia (1990).

Para um problema de diagnóstico genérico é conveniente definir os seguintes conjuntos ou funções baseadas na relação C :

$$efeitos(d_i) = \{m_j \mid \langle d_i, m_j \rangle \in C\} \quad (6)$$

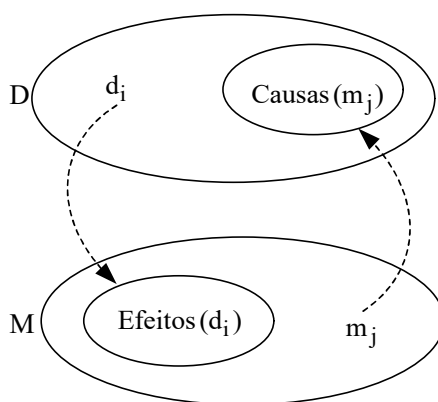
$$causas(m_j) = \{d_i \mid \langle d_i, m_j \rangle \in C\} \quad (7)$$

Sendo:

$efeitos(d_i)$: Conjunto de manifestações diretamente causadas por d_i ;
 $causas(m_j)$: Conjunto de desordens que podem diretamente causar m_j .

Os conjuntos $efeitos(d_i)$ e $causas(m_j)$ são ilustrados na Figura 6.

Figura 6 Conjuntos $efeitos(d_i)$ e $causas(m_j)$ definidos para a teoria de cobertura parcimoniosa



Fonte: Peng e Reggia (1990).

Um conjunto de desordens $D_I \subseteq D$ é uma cobertura de um conjunto de manifestações $M_J \subseteq M$ se $M_J \subseteq efeitos(D_I)$, sendo por definição:

$$efeitos(D_I) = \bigcup_{d_i \in D_I} efeitos(d_i) \quad (8)$$

$$causas(M_J) = \bigcup_{m_j \in M_J} causas(m_j) \quad (9)$$

Baseado nas duas últimas equações pode-se afirmar que um conjunto de manifestações dado por (8) é equivalente à união das manifestações individuais diretamente causadas pelas desordens d_i pertencentes ao conjunto D_I . Analogamente, o conjunto dado pela equação (9) é equivalente à união das desordens individuais diretamente causadas pelas manifestações m_j pertencentes ao conjunto M_J .

Assim por exemplo, baseado na Figura 5, pode-se obter alguns conjuntos a partir das equações (6) a (9):

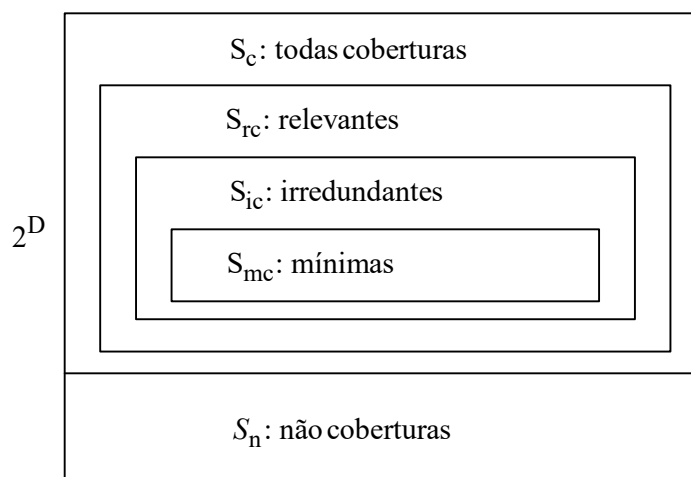
$$\begin{aligned}
\text{efeitos}(d_1) &= \{m_1, m_2, m_3\} \\
\text{efeitos}(d_2) &= \{m_1, m_2, m_4\} \\
\text{efeitos}(d_3) &= \{m_3, m_4\} \\
\text{efeitos}(d_4) &= \{m_2, m_4\} \\
\text{efeitos}(\{d_1, d_2\}) &= \{m_1, m_2, m_3, m_4\}, \text{ com } D_I = \{d_1, d_2\} \\
\text{efeitos}(\{d_3, d_4\}) &= \{m_2, m_3, m_4\}, \text{ com } D_I = \{d_3, d_4\} \\
\text{causas}(m_1) &= \{d_1, d_2\} \\
\text{causas}(m_2) &= \{d_1, d_4\} \\
\text{causas}(m_3) &= \{d_1, d_3\} \\
\text{causas}(m_4) &= \{d_2, d_3, d_4\} \\
\text{causas}(\{m_1, m_2\}) &= \{d_1, d_2, d_4\}, \text{ com } M_J = \{m_1, m_2\} \\
\text{causas}(\{m_2, m_3\}) &= \{d_1, d_3, d_4\}, \text{ com } M_J = \{m_2, m_3\}
\end{aligned} \tag{10}$$

Na teoria de cobertura parcimoniosa, uma hipótese para determinado diagnóstico deve ser uma cobertura de M^+ de modo a explicar a presença de todas as manifestações em M^+ . Baseado nesta afirmação pode-se definir o conjunto E . Um conjunto $E \subseteq D$ é considerado uma *explicação* de M^+ para um problema P definido pela equação (1) se e somente se E cobre M^+ e E satisfaz determinado critério de parcimônia. A definição de “explicação” m consiste de três condições: 1) o requerimento de cobertura (cada manifestação em M^+ deve ser associado a algum membro de E); 2) o requerimento de parcimônia (a cobertura deve ser parcimoniosa), e, 3) o requerimento de que uma explicação deve consistir de somente desordens.

Uma questão central sobre a teoria de cobertura parcimoniosa está diretamente relacionada à condição 2): qual é a natureza de parcimônia ou simplicidade? Em outras palavras, o que faz com que uma cobertura de M^+ seja mais plausível do que outra? Diferentes critérios de parcimônia já foram discutidos em Peng e Reggia (1986): (1) restrição de desordem única (*single-disorder restriction*): uma cobertura D_I de M^+ é uma *explicação* se ele contém somente uma única desordem; (2) Minimalidade (*minimality*): uma cobertura D_I de M^+ é uma *explicação* se ela possui cardinalidade mínima entre todas as coberturas de M^+ , isto é, ela

contém o menor número possível de desordens necessárias para cobrir M^+ ; (3) irredundância (*irredundancy*): uma cobertura D_I de M^+ é uma *explicação* se ele não contém subconjuntos que também cobrem M^+ , isto é, removendo qualquer desordem de D_I resulta em uma não cobertura de M^+ ; (4) relevância (*relevancy*): uma cobertura D_I de M^+ é uma *explicação* se ela contém somente desordens pertencentes ao conjunto causas (M^+), isto é, cada d_i deve ser associado com algum $m_j \in M^+$. Assumindo que pelo menos uma manifestação está presente, uma cobertura de restrição de desordem única é mínima. Além disso, o conjunto de todas as coberturas mínimas está sempre contido no conjunto de todas as coberturas irredundantes, que por sua vez está sempre contido no conjunto de todas as coberturas relevante (Figura 7).

Figura 7 Relações de espaços de soluções entre os tipos de critérios definidos para parcimônia. $\emptyset \subseteq S_{mc} \subseteq S_{ic} \subseteq S_{rc} \subseteq S_c \subseteq 2^D = S_c \cup S_n$.



Fonte: Peng e Reggia (1990).

Baseado na Figura 5 e considerando que as manifestações observáveis são dadas por $M^+ = \{m_1, m_3\}$, então tem-se: $D_1 = \{d_1\}$ é cobertura mínima de M^+ e, portanto, $S_{mc} = D_1$. A cobertura $D_2 = \{d_2, d_3\}$ é irredundante mas não mínima porque nem d_2 ou d_3 sozinhos podem cobrir M^+ e $S_{ic} = D_2$. A cobertura $D_3 = \{d_1, d_2, d_3\}$ é relevante mas redundante porque um de seus subconjuntos próprios, isto é, $\{d_2, d_3\}$, é uma cobertura de M^+ . Além disso, $D_4 = \{d_1, d_2\}$ e $D_5 = \{d_1, d_3\}$ são coberturas

relevantes e redundantes de M^+ , e portanto $S_{rc} = D_3, D_4, D_5$. Os conjuntos $D_6 = \{d_1, d_4\}$, $D_7 = \{d_1, d_2, d_4\}$, $D_8 = \{d_1, d_3, d_4\}$, $D_9 = \{d_2, d_3, d_4\}$ e $D_{10} = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ são coberturas irrelevantes de M^+ porque $d_4 \notin causas(\{m_1, m_3\}) = \{d_1, d_2, d_3\}$. Finalmente os conjuntos $D_{11} = \{d_2\}$, $D_{12} = \{d_3\}$, $D_{13} = \{d_4\}$, $D_{14} = \{d_2, d_4\}$, $D_{15} = \{d_3, d_4\}$ e $D_{16} = \emptyset$ não são coberturas de M^+ . Desta forma $S_c = D_1, \dots, D_{10}$, $S_n = D_{11}, \dots, D_{16}$ e $2^D = S_c \cup S_n = \{d_1\}, \{d_2\}, \{d_3\}, \{d_4\}, \{d_1, d_2\}, \{d_1, d_3\}, \{d_1, d_4\}, \{d_2, d_3\}, \{d_2, d_4\}, \{d_3, d_4\}, \{d_1, d_2, d_3\}, \{d_1, d_2, d_4\}, \{d_1, d_3, d_4\}, \{d_2, d_3, d_4\}, \{d_1, d_2, d_3, d_4\}, \emptyset$.

4 MODELO MATEMÁTICO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

Neste capítulo, apresenta-se a primeira proposta deste trabalho, o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica (PDFSTEE) que é resolvido de forma exata através de modelo matemático que associa os alarmes informados pelo sistema SCADA com os estados esperados das funções de proteção e disjuntores alocados no sistema elétrico. Neste capítulo, um modelo de programação não-linear inteiro binário (PNLIB) é proposto para a otimização do problema de diagnóstico de faltas para a estimação de seções em falta. As seções do sistema são modeladas como transformadores, linhas de transmissão e barras. O diagnóstico dos estados dos disjuntores que atuaram indevidamente deve ocorrer em uma fase posterior à resolução deste modelo matemático.

O modelo de PNLIB proposto para o diagnóstico de faltas é formulado fundamentalmente baseado em: uma função objetivo estabelecida sobre o critério de parcimônia de minimalidade; e um modelo matemático de operação do sistema de proteção que modela a filosofia de proteção utilizada no sistema elétrico de transmissão protegido e a lógica de atuação da proteção.

O critério de parcimônia de minimalidade é utilizado para estabelecer as hipóteses mais plausíveis ou as explicações lógicas para um conjunto de alarmes informados. As restrições fundamentais da operação da proteção de um sistema elétrico de transmissão são consideradas no modelo matemático proposto: o conjunto de equações dos estados esperados das funções de proteção dos relés do sistema elétrico baseadas na lógica de operação das funções de proteção (diferencial, distância e sobrecorrente) usando os critérios que definem a filosofia de proteção adotada para a proteção de sistemas elétricos. Portanto, o modelo matemático é completo e representa adequadamente o funcionamento da proteção do sistema elétrico. Todas as formulações matemáticas são completas e explícitas, por isso este modelo matemático de PNLIB pode ser resolvido de forma exata através de técnicas clássicas de otimização.

Este capítulo está dividido da seguinte forma: na seção a, apresenta-se inicialmente a formulação do problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão; na seção b, apresenta-se o modelo matemático de PNLIB para

diagnóstico de faltas proposto neste capítulo; e na seção 4.3, apresentam-se as linearizações realizadas, a formulação e formalização do modelo matemático de PLIB.

A. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALTAS

Nesta seção apresentam-se as teorias fundamentais para a formulação do modelo matemático para o diagnóstico de faltas em sistemas elétricos, válido tanto para o modelo de programação não linear inteira binária (PNLIB), como para o modelo de programação linear inteira binária (PLIB). Os modelos matemáticos são fundamentados empregando a teoria de cobertura parcimoniosa aplicada ao problema de diagnóstico de faltas em sistemas elétricos (PENG; REGGIA, 1990; WEN; CHANG, 1997) e um conjunto de equações matemáticas de operação do sistema de proteção que modela a filosofia de proteção utilizada no sistema elétrico de transmissão protegido e a lógica da atuação da proteção (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010).

1.1.6 Teoria de cobertura parcimoniosa aplicada ao diagnóstico de faltas em sistemas elétricos de potência

Conforme explicado no capítulo anterior, a teoria de cobertura parcimoniosa ou “*Parcimonious Set Covering Theory*” tem o objetivo de fornecer o embasamento teórico para modelos matemáticos baseados em associação. Para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas elétricos deve-se considerar o seguinte: 1) os alarmes gerados pelo sistema de proteção e 2) as seções (linhas, barras, transformadores, fontes auxiliares etc.) que potencialmente podem estar sob falta. Nesse sentido, é possível particularizar o problema genérico descrito pela equação (1) no problema de diagnóstico de faltas em sistemas elétricos (PDFSTEE) utilizando a seguinte notação (LEÃO, 2011):

$$P_{DFSP} = \langle S, A, P_s, A^+ \rangle \quad (11)$$

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_{ns}\} \quad (12)$$

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_{na}\} \quad (13)$$

$$P_s \subseteq S \times A \quad (14)$$

$$A^+ \subseteq A \quad (15)$$

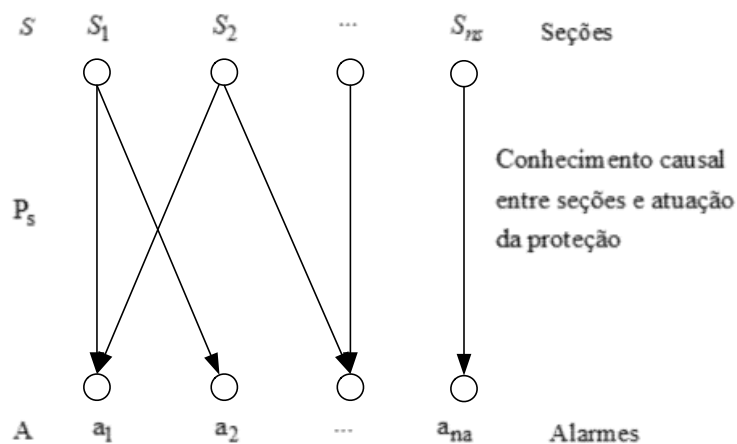
Sendo:

- S : Conjunto de todas as n_s seções do sistema elétrico;
- A : Conjunto de todos os n_a alarmes do sistema de proteção;
- P_S : Representa a relação com *domínio* $(P_S)=S$ e *imagem* $(P_S)=A$ denominado conjunto causa;
- A^+ : É um subconjunto de A contendo os alarmes presentes e informados pelo sistema SCADA em determinada situação de falta.

Sem perda de generalidade, todas as propriedades válidas para o problema da equação (1) também são válidas para o problema dado por (11).

Em particular, a expressão (14) define a relação entre as seções sob falta e os alarmes atuados para cada seção. Desta forma o par $\langle s_i, a_j \rangle \in P_S$ se e somente se “uma falta na seção s_i pode causar a atuação do alarme a_j ”. Na Figura 8 é ilustrada uma rede causal particularizada para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de potência e as relações causais apresentadas nesta figura descrevem todos os possíveis alarmes que podem ocorrer para cada seção sob falta.

Figura 8 Rede Causal para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de potência



Fonte: (LEÃO, 2011)

A relação P_S representa de forma intuitiva o conhecimento a respeito da: 1) lógica de atuação de todos os dispositivos de proteção do sistema elétrico; 2) filosofia de proteção empregada para proteger o sistema elétrico.

O conhecimento envolvido em 1) representa o conhecimento que descreve a maneira como cada dispositivo atua, tal como, quais funções de proteção estão envolvidas na falta e como elas atuariam para determinada seção sob falta. Por outro lado, a filosofia de proteção define o alcance no sistema de cada função (quais seções serão protegidas para diferentes funções de proteção), coordenação, seletividade e quais funções atuarão como proteção principal e como proteção de retaguarda.

O diagnóstico efetuado por um operador em um centro de operações inicia-se partir de uma falta no sistema elétrico. Neste momento alarmes são produzidos (conjunto A^+) devido à falta, e o operador através da IHM deve analisá-los em tempo real e obter um diagnóstico de qual(is) seção(ões) está(ão) sob falta, ou seja, identificar as seções, suas localizações no sistema e o tipo de falta (monofásica, bifásica, trifásica). Esta tarefa não é fácil quando se considera um sistema elétrico de grande porte. Isto porque a quantidade de alarmes informados pode ser grande e sobrecarregar o operador, dificultando a tomada de decisão, aumentando o tempo de restauração e o risco de danificar os equipamentos. No processo de diagnóstico o operador utiliza seu conhecimento sobre a atuação do sistema de proteção (simbolicamente representado pela relação P_s) e a experiência adquirida em casos de falta passados (que leva em conta condições de contingência do sistema elétrico) para, baseado em inferência lógica abdutiva, formular um conjunto de hipóteses concorrentes ou uma hipótese (subconjunto de S) que possa explicar corretamente o conjunto de alarmes A^+ observados.(LEÃO, 2011)

Além do conhecimento “estático” do operador representado pelas relações causais descritas por P_s é necessário que no processo de diagnóstico o operador leve em conta as incertezas do sistema de proteção, tal como, falhas de atuação de relés e disjuntores e alarmes corrompidos (alarmes falsos ou perda de alarmes devido a falha de comunicação entre o sistema SCADA e os dispositivos de proteção ou UTR). Desta forma, alguns alarmes podem não ser observados em uma situação pós-falta mesmo que a relação causal entre a seção sob falta e os alarmes exista (LEÃO, 2011).

Do ponto de vista computacional o problema definido pela equação (11) pode ser dividido em duas partes principais. A primeira parte deve estar relacionada ao

conhecimento adquirido pelos operadores e pode ser representado simbolicamente através da rede causal ilustrada na Figura 8. A segunda parte utiliza as relações causais definidas pela primeira parte (conhecimento) bem como as incertezas inerentes ao sistema de proteção para alcançar uma hipótese plausível e que possa “explicar”, do ponto de vista da teoria de cobertura parcimoniosa, a condição do sistema elétrico após a ocorrência de uma falta. Desta forma, o conhecimento representado pela relação PS deve ser modelado computacionalmente através de um modelo matemático que descreva o comportamento do sistema de proteção quando da ocorrência de uma falta no sistema elétrico. O modelo matemático então deve ser relacionado a um modelo de inferência lógica abdutiva para que a partir dos alarmes informados pelo sistema de proteção possa gerar a(s) hipótese(s) mais plausível(is) ou solução(ões) utilizando um dos critérios de parcimônia apresentados na seção 1.1.5.1. Deve-se observar que o operador utiliza sua inteligência, raciocínio lógico aliados ao conhecimento adquirido para realizar o diagnóstico. Para executar algo próximo à tarefa do operador de modo a assisti-lo, uma metodologia deve ser capaz de usar conhecimento e inteligência que podem ser implementados computacionalmente e apresentar um tempo de processamento razoável a fim de analisar e interpretar os alarmes em tempo real (LEÃO, 2011).

1.1.7 Modelo de operação do sistema de proteção

Como já foi mencionado, a principal função dos sistemas de proteção é assegurar a desconexão das seções do sistema elétrico submetidos a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos. A proteção de um sistema de energia é planejada tomando como base relés e fusíveis incorporados necessariamente a um disjuntor que é a parte mecânica responsável pela desconexão do circuito afetado com a fonte supridora. Os relés são dispositivos com diferentes formas de construção e funções de proteção incorporadas para aplicações diversas, dependendo de quais componentes da rede se objetiva proteger. Eles devem atuar sobre o equipamento responsável pela desconexão do circuito elétrico afetado (normalmente um disjuntor). A elevação da magnitude da corrente, elevação e redução da magnitude da tensão, inversão do sentido do fluxo de potência, alteração da impedância do sistema são, de forma geral, parâmetros que analisados podem ser utilizados para a detecção de um defeito em um sistema de potência (FILHO; MAMEDE, 2011).

Um projeto de proteção deve ser caracterizado por propriedades fundamentais para conseguir um bom desempenho como (FILHO; MAMEDE, 2011):

- Seletividade: o elemento de proteção mais próximo ao do defeito desconecta a parte defeituosa do sistema elétrico.
- Zonas de atuação: durante a ocorrência de um defeito, o elemento de proteção deve ser capaz de definir se aquela ocorrência é externa ou interna à zona protegida. Se a ocorrência está dentro dos limites da zona protegida, o elemento de proteção deve atuar e acionar a abertura do disjuntor associado. Se a ocorrência está fora dos limites da zona protegida, o relé não deve ser sensibilizado pela grandeza elétrica do defeito ou, se for, o seu sistema restritor de atuação deve ser bloqueado.
- Velocidade: desde que seja definido um tempo mínimo de operação para um elemento de proteção, a velocidade de atuação deve ser a menor possível, a fim de propiciar, redução ou mesmo eliminação de danos no sistema protegido.
- Sensibilidade: consiste na capacidade do elemento de proteção em reconhecer com precisão a faixa e os valores indicados para a sua operação e não operação.
- Confiabilidade: é a propriedade do elemento de proteção cumprir com segurança e exatidão as funções que lhe foram confiadas.
- Automação: consiste na propriedade do elemento de proteção de operar automaticamente quando for solicitado pelas grandezas elétricas que o sensibilizam e retornar sem auxílio humano, se isso for conveniente, à posição de operação depois de cessada a ocorrência.

1.1.7.1 Lógica de atuação e filosofia de proteção empregada

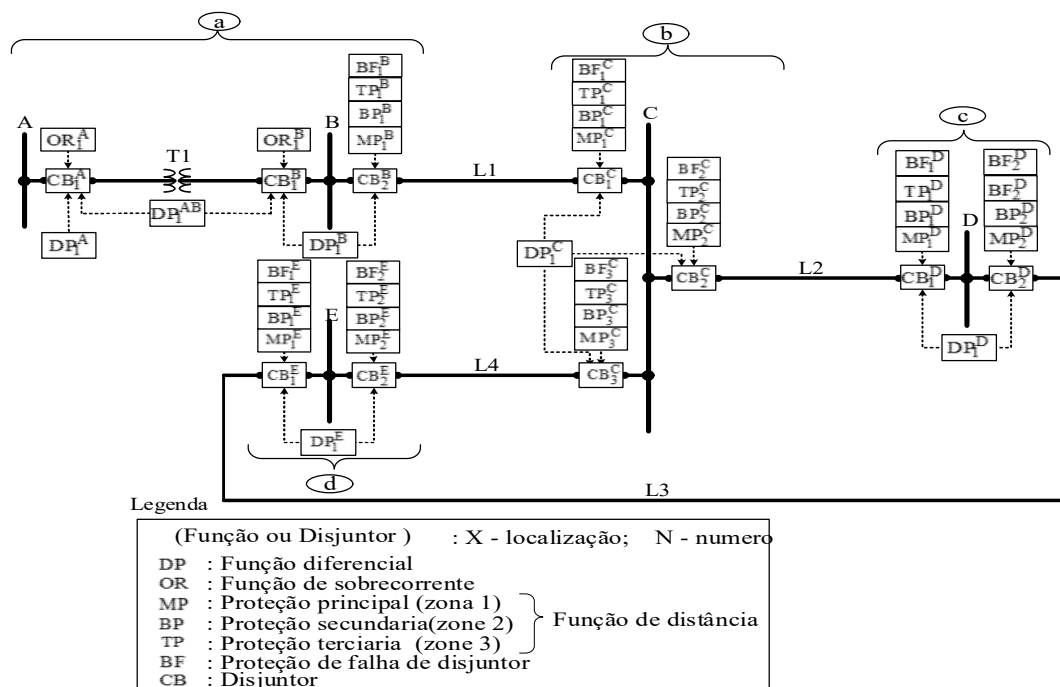
Dentro dessa ideia geral, os chamados princípios fundamentais da filosofia da proteção com relés compreendem a proteção primária e a proteção de retaguarda. A proteção primária é aquela em que uma zona de proteção separada é estabelecida ao redor de cada elemento do sistema, pelo que disjuntores são colocados na conexão de cada dois elementos do circuito. A proteção de retaguarda, cuja finalidade é a de atuar na manutenção da proteção primária ou falha desta, só é usada, por motivos econômicos para determinados elementos do circuito e somente contra curto-circuito. No entanto, sua previsão deve-se à probabilidade de ocorrer falhas, seja na

corrente ou tensão fornecida ao relé, na fonte de corrente de acionamento do disjuntor, no circuito de disparo ou no mecanismo do disjuntor ou no próprio relé, entre outros (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010).

Neste trabalho empregou-se a função diferencial (DP) como a proteção principal das barras e dos transformadores, além disso, usou-se a função de sobrecorrente (OR), como proteção de retaguarda de transformadores e das barras. Foi considerado um modelo de proteção de 3 zonas utilizando funções de distância para linhas de transmissão. Para a zona 1 ou proteção principal (MP) ela atinge cerca de 100 % da longitude da linha; para a zona 2 ou proteção de retaguarda (BP) ela atinge aproximadamente 150-200 % da longitude da linha onde o relé de proteção está alocado. Além disso, a zona 2 também protege as barras no terminal oposto do ponto da alocação do relé. Para a zona 3, ou terciária (TP), o relé de distância deve alcançar 150-200% da linha protegida onde o relé está instalado mais cerca de 100% da linha mais longa adjacente. Também, considerou-se que as funções de distância são direcionais e não têm zona inversa, ou seja, elas protegem somente a seção do circuito como das linhas adjacentes a barra onde o relé está alocado.

Na Figura 9 é ilustrado um sistema de energia elétrica usado para estabelecer a filosofia empregada para o desenvolvimento do modelo matemático. O sistema de energia elétrica compreende 4 subestações a, b, c e d. Cada subestação tem uma fonte DC (corrente contínua) fornecendo o serviço auxiliar de energia ao sistema de proteção. Se uma fonte DC falhar, não haverá alarmes de qualquer função de proteção do relé associado a essa subestação. Considera-se como uma seção a parte de um circuito entre dois disjuntores (CB). Por exemplo, a seção L2 está entre os disjuntores CB_2^C e CB_1^D ; a barra C está entre os disjuntores CB_1^C , CB_2^C e CB_3^C . Outras seções podem ser definidas assim analogamente.

Figura 9 Diagrama genérico exemplificando a filosofia de proteção adotada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se ocorrer uma falta na linha 1 do sistema de energia elétrica da Figura 9, primeiro atuará a função de proteção primária ou principal. Por exemplo, as funções MP_1^C e MP_1^B devem enviar sinal de *trip* para os disjuntores CB_2^B e CB_1^C abrirem respectivamente, se e somente se, as fontes DC da subestação a e da subestação b não falharem. A segunda zona de proteção, as funções de retaguarda da linha L1 são as funções BP_1^B , BP_1^C , BP_1^D e BP_1^E e essas funções enviam sinal de *trip* aos disjuntores quando a proteção primária não atua, isto é, se as respectivas fontes DC das subestações b, c e d não falharem. A terceira zona de proteção, a função terciária TP da linha L1 é composta pelas funções TP_1^B , TP_1^C , TP_1^D e TP_1^E . Elas enviam um sinal de *trip* aos disjuntores quando a função de proteção primária e secundária não atuou e as fontes DC das subestações a, b, c e d não falharem. A terceira zona inclui a barra e terceira linha adjacente. Além disso, no sistema da Figura 9 apresenta-se a função de proteção de falha do disjuntor BF, cuja função principal é atuar se a função principal (MP), a função de retaguarda (BP) e a função terciária (TP) atuarem e os

disjuntores não abrirem e assim enviar um sinal de *trip* aos disjuntores mais próximos para que estes abram e isolem a falta.

B. MODELO MATEMÁTICO DE PNLIB PROPOSTO

Nesta seção, apresenta-se o modelo matemático de PNLIB proposto para o diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica. Este modelo matemático realiza o diagnóstico de faltas em uma única etapa, possibilitando a estimação das seções em falta e a determinação dos disjuntores que atuaram indevidamente. O modelo é apresentado nas relações (16) a (28).

$$MIN FO = k_1 \times \left(\sum_{i \in NF} Co_i \right) + k_2 \times \left(\sum_{i \in NF} In_i \right) + k_3 \times \left(\sum_{i \in NS} S_i + \sum_{i \in NB} b_i \right) \quad (16)$$

s.a.

$$Co_i = f_{sci} \times (1 - f_i) \quad \forall i \in NF \quad (17)$$

$$In_i = |f_{sci} - f_i|, \forall i \in NF \quad (18)$$

$$DP_j = S_i \times (1 - b_k) \quad \forall j \in NDP, \forall i \in NSDP, \forall k \in NB \quad (19)$$

$$MP_l = S_i \times (1 - b_k) \quad \forall l \in NMP, \forall i \in NSMP, \forall k \in NB \quad (20)$$

$$BP_r = Max \left\{ S_i \times \left[1 - ONE \left(\sum_{t \in \Omega_i} C_t \right) \right], S_i \times (1 - MP_{sc}) \right\} \times (1 - b_k) \quad (21)$$

$$\forall r \in NBP, \forall i \in NSMP, \forall k \in NB, \forall t \in \Omega_l$$

$$TP_p = Max \left\{ S_i \times \left[1 - ONE \left(\sum_{t \in \Omega_i} C_t \right) \right], S_i \times (1 - MP_{sc}), S_i \times (1 - BP_{sc}) \right\} \times (1 - b_k) \quad (22)$$

$$\forall p \in NTP, \forall i \in NSMP, \forall k \in NB, \forall t \in \Omega_l$$

$$OR_m = Max \left\{ S_i \times \left[1 - ONE \left(\sum_{t \in \Omega_i} C_t \right) \right], S_i \times (1 - DP_{sc}) \right\} \times (1 - b_k) \quad (23)$$

$$\forall m \in NOR, \forall i \in NSDP, \forall k \in NB, \forall t \in \Omega_l$$

$$BF_d = \text{Max} \left\{ ONE \left(\sum_{i \in NIP} Temo_i \right) \times IP_{sc_p}, ONE \left(\sum_{i \in NI} Temo_i \right) \times BP_{sc_r}, ONE \left(\sum_{i \in \Omega_s} Temo_i \right) \times (1 - MP_{sc_i}) \right\} \times (1 - b_k) \times (1 - C_t) \quad (24)$$

$$\forall d \in NCB, \forall p \in NIP, \forall i \in NSMP, \forall k \in NB, \forall t \in \Omega_t$$

$$Co_i, In_i, f_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in NF \quad (25)$$

$$S_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in NS \quad (26)$$

$$b_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in NB \quad (27)$$

$$DP, OR, MP, BP, TP, BF \in \{0, 1\} \quad (28)$$

1.1.8 Descrição dos conjuntos, variáveis e parâmetros do modelo matemático

A descrição dos conjuntos do modelo proposto é a seguinte:

- NF é o conjunto de funções de proteção dos relés alocados no sistema elétrico de transmissão, fundamentais para resolver problema de diagnóstico de faltas. Assim, $|NF|$ é o número total de funções de proteção disponibilizados no sistema elétrico.
- NS é o conjunto de seções do sistema elétrico de transmissão, que podem ser barras, transformadores e linhas de transmissão. Assim $|NS|$ é o número total de seções que compõe o sistema elétrico de transmissão.
- NB é o conjunto de fontes de corrente contínua (CC) ou baterias existentes em cada uma das subestações do sistema elétrico. Assim $|NB|$ é o número total de fontes de corrente contínua existente no sistema elétrico.
- NDP é o conjunto dos relés diferenciais alocados para proteger as barras do sistema elétrico. Sendo o conjunto $NDP \subset NF$. Assim $|NDP|$ é o número total de relés diferenciais do sistema elétrico de transmissão.
- $NSDP$ é o conjunto das seções protegidas pelos relés diferenciais (DP) no sistema elétrico. Sendo o conjunto $NSDP \subset NS$. Assim $|NSDP|$ é o número total de seções protegidas pelos relés diferenciais.

- NOR é o conjunto dos relés de sobrecorrente (OR) no sistema elétrico de transmissão. Sendo o conjunto $NOR \subset NF$. Assim $|NOR|$ é o número total de relés de sobrecorrente do sistema elétrico.
- $\Omega_{i,j}$ é o conjunto de disjuntores existentes no trecho entre o relé i que protege a seção j .
- NMP é o conjunto dos relés de distância que realizam a proteção de primeira zona das linhas de transmissão do sistema elétrico. Sendo o conjunto $NMP \subset NF$. Assim $|NMP|$ é o número total de relés de distância de proteção principal do sistema elétrico de transmissão.
- $NSMP$ é o conjunto das seções protegidas pelos relés de distância MP no sistema elétrico de transmissão. Sendo $NSMP \subset NS$. Assim $|NSMP|$ é o número total de seções protegidas pelos relés de distância de proteção principal no sistema.
- NBP é o conjunto dos relés de distância que realizam a proteção de segunda zona (retaguarda) das linhas de transmissão do sistema elétrico. Sendo o conjunto $NBP \subset NF$. Assim $|NBP|$ é o número total de relés de distância de proteção secundária do sistema elétrico de transmissão.
- NTP é o conjunto dos relés de distância que realizam a proteção de terceira zona (retaguarda) das linhas de transmissão do sistema elétrico. Sendo o conjunto $NTP \subset NF$. Assim $|NTP|$ é o número total de relés de distância de proteção terciária do sistema elétrico de transmissão.

A descrição das funções do modelo proposto é a seguinte:

- $\max\{\cdot\}$ é a função matemática que extrai o maior valor binário dos elementos entre colchetes.
- $ONE(x)$ é uma função binária. Se x for maior ou igual a 1, então $ONE(x) = 1$, caso contrário $ONE(x) = 0$.

A descrição dos parâmetros do modelo proposto é a seguinte:

- f_{sci} é o alarme da função i de proteção do relé informado pelo sistema SCADA. f_{sci} é um parâmetro binário geral para representar os alarmes das funções de proteção i , ou seja, $DP_{sci}, MP_{sci}, OR_{sci}, BP_{sci}, TP_{sci}, BF_{sci}$, e portanto se $f_{sci} = 1$, a função de proteção i do relé atuou e se $f_{sci} = 0$ não atuou.
- C_t são os alarmes informados pelos disjuntores. Se $C_t = 0$, significa que o disjuntor t está fechado (não atuado) e $C_t = 1$ significa que o disjuntor t está aberto (atuado).
- k_1, k_2, k_3 são constantes e inteiros positivos, ponderações, para refletir a importância da solução mínima na função objetivo.

Finalmente, a descrição das variáveis do modelo proposto é a seguinte:

- Co_i é a variável binária que reflete se a solução do PDFSTEE é uma cobertura dos alarmes informados, ou seja, o estado esperado dos dispositivos e componentes do sistema relacionados com a solução mínima deve cobrir os alarmes informados nos relatórios de operação do sistema elétrico.
- In_i é a variável binária que representa a inconsistência entre os alarmes informados (f_{sci}) e os estados esperados das funções de proteção dos relés. Para um diagnóstico correto de um defeito considerado, os estados esperados dos relés devem ser o mais consistente possível com os alarmes desses dispositivos.
- b_k é a variável binária que representa os estados das fontes de corrente contínua (banco de baterias) localizadas em cada uma das subestações. $b_k = 0$ corresponde à fonte de corrente contínua k em condição normal e $b_k = 1$ corresponde à falha na fonte de corrente contínua k .
- f_i são os estados esperados das funções de proteção dos relés de proteção. f_i é uma variável geral binária para representar as funções de proteção dos relés $DP_j, MP_l, BP_r, OR_m, TP_p, BF_d$.

- DP_j é o estado esperado do relé diferencial j localizado na barra do sistema. DP_j é uma variável binária e $DP_j=0$ corresponde ao relé diferencial j não acionado e $DP_j=1$ ao relé acionado (envio de sinal de *trip*/comando) para os respectivos disjuntores abrirem.
- MP_l é o estado esperado do relé de proteção principal de distância l . MP_l é uma variável binária e $MP_l=0$ corresponde ao relé de proteção principal (de primeira zona) l não acionado enquanto $MP_l=1$ ao relé acionado (envio de sinal de *trip*/comando) para os respectivos disjuntores abrirem.
- BP_r é o estado esperado do relé de proteção secundária (segunda zona) r . BP_r é uma variável binária e $BP_r=0$ corresponde ao relé de proteção secundária r não acionado e $BP_r=1$ corresponde ao relé de proteção secundária acionado.
- TP_p é o estado esperado do relé de proteção terciária (terceira zona) p . TP_p é uma variável binária e $TP_p=0$ corresponde ao relé p não acionado e $TP_p=1$ ao relé de proteção terciária acionado.
- OR_m é o estado esperado do relé de sobrecorrente m localizado no transformador do sistema elétrico. Se $OR_m=0$ corresponde ao relé de sobrecorrente m não atuado e $OR_m=1$ corresponde ao relé atuado, ou seja, o envio de um sinal de *trip* para os disjuntores abrirem.
- BF_d é a função de proteção 50BF de determinado relé que tem a finalidade de enviar *trip* diretamente para um disjuntor mais próximo capaz de impedir a corrente de curto-circuito, caso o disjuntor comandado pelo relé que possui a função 50BF falhe após o comando de *trip*. Se $BF_d=0$ corresponde a função não atuada e $BF_d=1$ corresponde a função atuada.

1.1.9 Descrição das relações do modelo proposto

A função objetivo e o conjunto de restrições do modelo matemático apresentado nas relações (16) a (28) são descritos nesta seção.

Conforme apresentado na seção anterior o modelo de PNLIB para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão é composto pela função objetivo (16) e as restrições (17) e (18) que utilizam os critérios estabelecidos pela teoria de cobertura parcimoniosa utilizadas em (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010; PENG; REGGIA, 1990; WEN; CHANG, 1997). É preciso ressaltar que neste trabalho as restrições (17) e (18) são incorporadas como restrições do modelo PNLIB proposto. Aliás, nota-se a não linearidade da restrição (18). Adicionalmente o modelo é composto pelo conjunto de equações dos estados esperados das funções de proteção dos relés desenvolvidas em (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010). Nota-se que as equações dos estados esperados (19)-(24) são incorporadas como restrições não lineares no modelo proposto. Portanto, torna-se evidente que o modelo PNLIB proposto é um problema combinatório não linear, não convexo que requer grande esforço computacional para ser resolvido.

A relação (16), é a função objetivo de minimização. A função é mono-objetivo e considera três critérios: (1) a solução deve ser uma cobertura dos alarmes informados das funções de proteção do relé; (2) os estados esperados dos relés que correspondem a uma solução mínima devem ser consistentes com os alarmes informados e (3) a solução deve ter um número mínimo necessário de seções sob falta para explicar o defeito.

O termo Co_i reflete se uma solução é ou não uma cobertura dos alarmes informados e se sim, $Co_i=0$, caso contrário Co_i reflete a proximidade de uma solução para uma cobertura dos alarmes informados. Co_i é calculado como apresentado na equação (17) sendo que f_{sci} é o parâmetro binário que representa o estado da função do relé informado pelos relatórios do sistema SCADA, e f_i é a variável binária que representa o estado esperado da função de proteção calculada, onde i vai de 1 até o número de relés de proteção do sistema ($|NF|$).

A restrição (18) reflete a inconsistência entre os alarmes informados f_{sci} e os estados esperados dos relés f_i . Portanto quando In_i é nulo o alarme informado (dado de entrada do modelo PNLIB) é consistente ao estado esperado do mesmo relé. O segundo termo da função objetivo (16) reflete a somatória de todas as inconsistências entre os alarmes informados e os estados esperados dos relés.

O terceiro termo da equação (16), $(S_i + b_i)$, significa o número total de seções com falta e falhas na fonte de corrente contínua (bateria) e seu valor será sempre não nulo quando houver qualquer defeito no sistema elétrico.

As constantes k_1, k_2, k_3 , incorporadas na equação (16), são números inteiros e são atribuídos a elas valores de modo a satisfazer $k_1 > k_2 > k_3$. Como se trata de um problema de minimização, deve-se escolher o maior valor para k_1 , de modo a descartar qualquer solução que não cubra os alarmes informados. Se a solução não cobre os alarmes informados, portanto, torna-se evidente que o valor deste seria bem alto. Deve-se usar um peso menor para k_2 de modo a descartar considerando este peso as soluções que sejam inconsistentes com os alarmes informados, pois esta constante está relacionada ao segundo termo de (1). Por fim, k_3 , deve ser o menor valor das três constantes, pois está relacionada ao terceiro termo de (1) que representa o número total de seções com falta e falhas nas baterias. Logo, é indiscutível o fato que a melhor solução é aquela onde o primeiro e segundo termo de (1) são nulos.

O conjunto de restrições (19) -(24) são as equações dos estados das funções de proteção do relé, que representam a operação do sistema de proteção, baseadas em critérios que definem a filosofia de proteção, adotadas nas companhias elétricas. Esse conjunto de restrições foram desenvolvidas e apresentadas em (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010) e neste trabalho incorporadas ao modelo PNLIB.

É importante ressaltar que em caso da ocorrência de uma falta em qualquer barra ou transformador do sistema elétrico de transmissão, os relés diferenciais DP deverão ser sensibilizados por essa falta e atuarem de forma a isolar o defeito de maneira a desenergizar os equipamentos ou barras que eles estão protegendo. Vê-

se, pois, a restrição (19) descreve os estados esperados dos relés diferenciais localizados nas barras e transformadores do sistema.

Os relés de distância foram equacionados considerando-se 3 zonas de atuação. Na zona primária de atuação ou proteção principal (*MP*) considerou-se que o dispositivo resguarda 100 % da linha a qual está conectado. A restrição (20) impõe o cumprimento da definição da proteção primária de linhas de transmissão *MP* e representa os estados esperados dos relés de distância de proteção primária.

Para a zona secundária dos relés de distância cuja função de proteção é estabelecida na restrição (21), considerou-se que o relé de distância possui um alcance de aproximadamente 150-200% da longitude da linha onde o relé de proteção está alocado. Por isso, fica evidente que o dispositivo somente irá atuar se a proteção principal das seções as quais ele protege falharem e também se todos os disjuntores entre a seção protegida e o ponto de alocação do relé estiverem fechados.

A restrição (22) indica o funcionamento da terceira zona de proteção de distância. O relé de distância possui um alcance de 150-200% da linha protegida onde o relé está instalado mais cerca de 100% da linha mais longa adjacente. Além disso, só irá atuar se a proteção primária e secundária das seções que ela protege falharem e se todos os disjuntores entre a seção que ele protege estiverem fechados. A restrição (23) descreve o comportamento das funções de sobrecorrentes para proteção secundária (retaguarda) de barras e transformadores. Assim, leva-se em consideração que esse dispositivo atuará quando houver uma falha na proteção principal das barras e/ou transformadores adjacentes à seção em que o relé de sobrecorrente está instalado.

A restrição (24) descreve a função *50BF* de determinado relé, e possui a finalidade de enviar *trip* diretamente para um disjuntor mais próximo capaz de impedir a corrente de curto-circuito, caso o disjuntor comandado pelo relé que possui a função *50BF* falhe após o comando de *trip*. A função *50BF* somente atuará se os seguintes eventos ocorrerem simultaneamente: 1) existir uma falta em determinada seção protegida pelas funções do relé que incluem a função *50BF*; 2) qualquer uma dessas funções atuarem devido a esta falta e, 3) que o disjuntor comandado pelas funções falhou.

Por último, as restrições (25)-(28) impõem a natureza binária das variáveis $Co_i, In_i, S_i, b_k, f_i, DP_j, OR_m, MP_l, BP_r, TP_p, BF_d$ respectivamente.

Finalmente o problema de PNLIB para o diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão é representado por:

Min (16)

Sujeito a (17)-(28).

Este modelo proposto é um problema combinatório, não convexo e de difícil solução. Com o objetivo de reduzir o esforço computacional e garantir a solução ótima, algumas técnicas são utilizadas para linearizar as expressões não lineares que dificultam a solução do problema. Na seguinte seção são mostradas as linearizações para a expressão (18) e o conjunto de restrições dos estados esperados das funções de proteção do relé (equações(19)-(24)).

C. MODELO DE PLIB PARA O DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

1.1.10 Linearização da restrição (In_i)

Neste trabalho, a restrição não linear dada pela equação (18) é linearizada considerando que a equação original, devido ao módulo, sempre resulta em valores maiores que zero. Realizando operações algébricas, têm-se as equações:

$$(f_{sci} - f_i) \leq In_i \quad \forall i \in NF \quad (29)$$

$$-(f_{sci} - f_i) \leq In_i \quad \forall i \in NF \quad (30)$$

Devido à natureza binária de todas as variáveis na expressão (18) as restrições (29) e (30) são linearizações exatas equivalentes da restrição (18).

1.1.11 Linearização da restrição dos estados esperados dos relés diferenciais (DP)

Nesta seção é apresentado um método para linearizar restrições no qual os produtos das variáveis são incorporados. Existem inúmeros problemas muito difíceis de resolver que dão origem a restrições não-lineares e o uso de variáveis binárias. Dentro da operação do sistema de proteção, considera-se fundamental a restrição

(19) para descrever a proteção principal de cada uma das barras e transformadores do sistema elétrico de transmissão. Nota-se que a restrição (19) é não linear e que pode ser escrita como:

$$DP_j = S_i - S_i b_k \quad (31)$$

Para linearizar a equação (31), em primeiro lugar considere as variáveis binárias S_i e b_k , sendo o produto $S_i b_k$ substituído por uma nova variável binária adicional $X_{i,k}^{va}$, resultando na equação (32):

$$DP_j = S_i - X_{i,k}^{va} \quad \forall j \in NDP, \quad \forall i \in NSDP, \quad \forall k \in NB \quad (32)$$

Sendo assim, as seguintes restrições forçam a variável $X_{i,k}^{va}$ a assumir o produto $S_i b_k$:

$$S_i + b_k - X_{i,k}^{va} \leq 1 \quad \forall i \in NSDP, \quad \forall k \in NB \quad (33)$$

$$X_{i,k}^{va} \leq S_i \quad \forall i \in NSDP, \quad \forall k \in NB \quad (34)$$

$$X_{i,k}^{va} \leq b_k \quad \forall i \in NSDP, \quad \forall k \in NB \quad (35)$$

$$X_{i,k}^{va} \in \{0,1\} \quad (36)$$

As restrições (32)-(36) são as restrições lineares exatas da restrição não linear (19) do modelo PNLIB.

1.1.12 Linearização da restrição dos estados esperados dos relés de distância (MP)

A proteção principal das linhas de transmissão é representada pela restrição (20). Esta equação não linear representa os estados esperados dos relés de proteção

principal ou de primeira zona localizados nas linhas de transmissão do sistema elétrico. A restrição (20) pode ser escrita como:

$$MP_l = S_i - S_i b_k \quad (37)$$

A não linearidade da equação (37) é dada pelo produto $S_i b_k$, sendo S_i e b_k duas variáveis binárias e o produto $S_i b_k$ substituído pela nova variável binária $X_{i,k}^{vb}$ resultando na equação (38):

$$MP_l = S_i - X_{i,k}^{vb} \quad \forall l \in NMP, \forall i \in NSMP, \forall i \in NB \quad (38)$$

Portanto obtém-se as restrições (39), (40), (41) e (42) que forçam a variável $X_{i,k}^{vb}$ a assumir o valor de $S_i b_k$:

$$S_i + b_k - X_{i,k}^{vb} \leq 1 \quad \forall i \in NSMP, \forall k \in NB \quad (39)$$

$$X_{i,k}^{vb} \leq S_i \quad \forall i \in NSMP, \forall k \in NB \quad (40)$$

$$X_{i,k}^{vb} \leq b_k \quad \forall i \in NSMP, \forall k \in NB \quad (41)$$

$$X_{i,k}^{vb} \in \{0,1\} \quad (42)$$

1.1.13 Linearização das restrições OR, BP, TP, BF.

Nesta seção são apresentadas as linearizações das restrições (21)-(24) com destaque ao produto da expressão $(1-b_k)$ com a função matemática $\max\{x\}$ presente em cada uma das restrições. No caso das restrições (21)-(24), trata-se certamente, de expressões não lineares que dificultam a solução do problema.

Para linearizar a restrição (21), substituiu-se a função matemática $\text{Max}\{\}$ e seu argumento, por uma variável binária auxiliar X_r^u em que $\forall r \in NBP$. Portanto, torna-se evidente que a restrição (21) pode ser escrita como:

$$BP_r = X_r^u \times (1 - b_k) \quad (43)$$

Desta forma a equação (43) pode ser reformulada como um produto de variáveis binárias e a linearização segue o mesmo procedimento realizado para a equação (19). Após operação algébrica a equação (44) é obtida:

$$BP_r = X_r^u - X_r^u b_k \quad (44)$$

Logo, consideram-se as variáveis binárias X_r^u e b_k , e o produto $X_r^u b_k$ é substituído por uma nova variável binária adicional X_k^{ub} , em que $k \in NB$. A partir desta consideração é obtida a seguinte equação:

$$BP_r = X_r^u - X_k^{ub} \quad (45)$$

Portanto obtêm-se as restrições (46), (47), (48) que forçam a variável X_r^u a assumir o valor de $X_r^u b_k$.

$$X_r^u + b_k - X_k^{ub} \leq 1 \quad (46)$$

$$X_k^{ub} \leq X_r^u \quad (47)$$

$$X_k^{ub} \leq b_k \quad (48)$$

Considerando a linearização da função $Max\{X\}$ tem-se que o número de termos dentro desta função depende da quantidade de seções protegidas pela função de distância de segunda zona:

$$X_r^u = \max(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (49)$$

Na equação (49) n é o número total de termos contidos na função $Max\{X\}$. A equação (49) pode ser expressa de forma linear como:

$$X_r^u \geq x_i \quad \forall i \quad (50)$$

A restrição (50) não impede que a variável X_r^u seja maior do que 1. Portanto o objetivo é que $X_r^u = x_1$ ou $X_r^u = x_2$ ou $X_r^u = x_n$. Neste caso é considerada uma nova variável adicional conforme equação (51):

$$X_i^y = \begin{cases} 1 & \text{se } X_r^u \leq x_i \\ 0 & \text{em outro caso} \end{cases} \quad (51)$$

Logo, pelo método Big M, considerando um parâmetro $M=1$, obtém-se (VIELMA, 2015):

$$X_r^u \geq x_i + M(1 - X_i^y) \quad \forall i \quad (52)$$

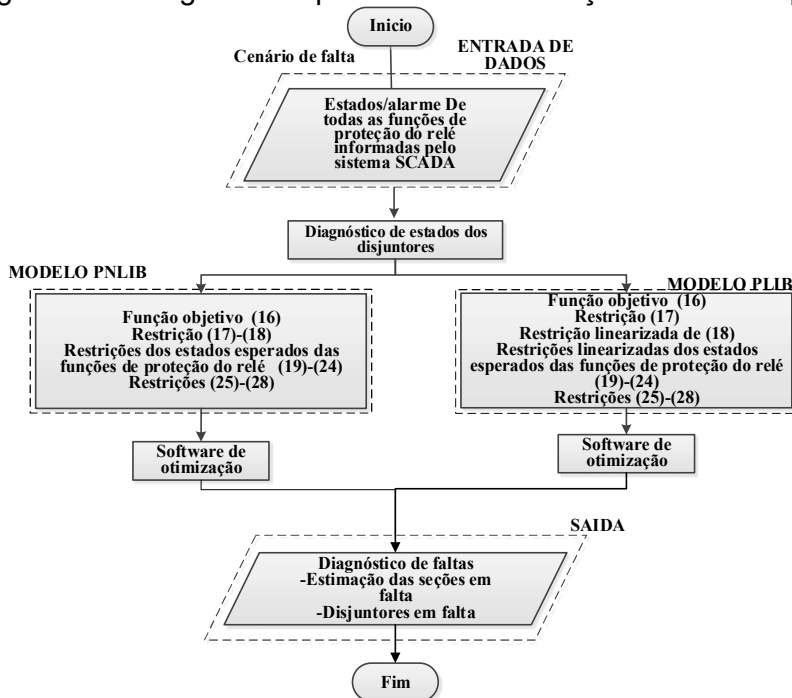
$$\sum_{i=1}^n X_i^y = 1 \quad (53)$$

Portanto a restrição não linear (21), é substituída pelas restrições lineares (45), (46), (47), (48), (50), (52), (53). Realizou-se este procedimento de linearização para o resto de restrições não lineares (22), (23), (24).

Na Figura 10 é ilustrado o fluxograma do método proposto. Primeiro são carregados os dados de entrada, ou seja, os cenários de falta para o sistema elétrico. Os cenários de falta contêm as informações sobre estados dos alarmes das funções de proteção dos relés e estado dos disjuntores alocados no sistema elétrico. O diagnóstico de disjuntores é realizado baseado na seguinte regra: uma falha somente

ocorre em um disjuntor se ele não abrir após receber o sinal de *trip* do relé ou se o disjuntor atuar sem o sinal de *trip* enviado do relé. O processo de otimização começa com os cálculos das variáveis que compõem a função objetivo e o conjunto de restrições do modelo PLIB ou PNLIB propostos. Esses resultados são processados pelo modelo PLIB ou modelo PNLIB propostos, que fornece o diagnóstico das seções em falta empregando um *software* de otimização.

Figura 10 Fluxograma do processo de otimização do método proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

D. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é apresentado o detalhamento matemático dos modelos de PNLIB e PLIB, em que as características da teoria de cobertura parcimoniosa e as características de operação do sistema de proteção são representadas através das equações e restrições dos modelos. O PNLIB é linearizado resultando no modelo de PLIB com características de um problema de programação linear inteira binária. Os modelos são formulados baseados em três zonas de proteção: primeira, segunda e terceira zona da proteção de distância além da proteção de falha de disjuntor, o que resulta um modelo de complexidade elevada. O PLIB é formulado através de uma

linearização binária exata e portanto é garantida a solução ótima do problema proposto.

5 TESTES E RESULTADOS

A. CONSIDERAÇÕES GERAIS

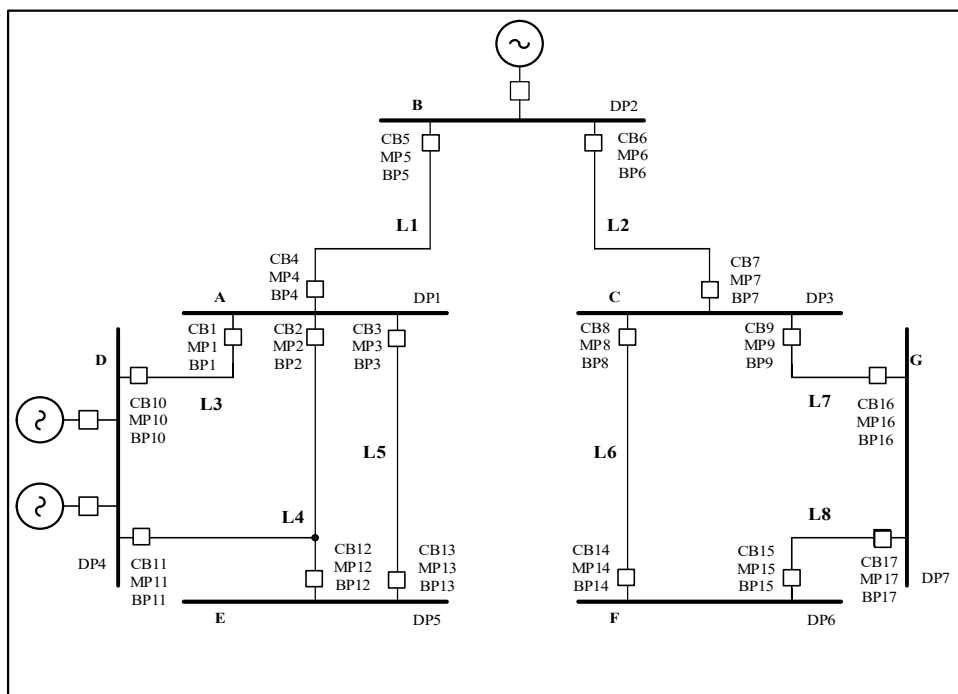
Nesta seção, apresentam-se os resultados dos testes realizados com os modelos PNLIB e PLIB propostos para resolver o problema de diagnóstico de faltas. Para avaliar o método proposto neste trabalho são realizados testes com um sistema de energia elétrica e busca-se apresentar as principais características e contribuições dos métodos propostos. São apresentados resultados obtidos usando o algoritmo genético adaptativo (AGA) (ESCOTO; BERTEQUINI, 2016; LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2014) de modo a realizar um estudo comparativo com a meta-heurística já aplicada ao problema de diagnóstico de faltas. Os modelos foram avaliados usando quatro sistemas testes: um sistema menor de 7 barras com o objetivo de ilustrar as metodologias implementadas; um sistema de 14 barras referido como parte do sistema sul brasileiro e finalmente em um sistema de 39 barras, sistemas disponíveis na literatura especializada (DAMCHI; SADEH; MASHHADI, 2016; MARCOLINO; LEITE; MANTOVANI, 2015; STACCHINI DE SOUZA *et al.*, 2004). O modelo PNLIB e PLIB são implementados computacionalmente em linguagem de modelagem matemática AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003). Para resolver o modelo PNLIB é utilizado o software de otimização ILOG CP CPLEX Optimizer (CPLEX CP OPTIMIZER, 2016) e o modelo PLIB é resolvido usando o solver comercial CPLEX versão 12.7.0 (CPLEX, 2015). O AGA é implementado na linguagem de programação C++ e para aplicação do AGA é necessária a calibração dos parâmetros: número de gerações igual a 80 e tamanho de população igual a 100. Neste trabalho, após diversos testes, utilizou-se $k_1 = 1000$, $k_2 = 10$, $k_3 = 1$. Para a realização dos testes é utilizado um notebook com processador Intel Core i7, 2.2 GHZ com 12 GB de memória RAM.

B. SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA DE 7 BARRAS

O sistema mostrado na Figura 11 é apresentado como um exemplo ilustrativo para a implementação dos modelos propostos para o problema de diagnóstico de faltas. O sistema teste conta com as seguintes características: número de funções de proteção do relé $nf = 43$, número de disjuntores (CB) = 17 e número de seções = 15.

Adicionalmente, o sistema elétrico consiste em sete barras (A-G), oito linhas de transmissão (L1-L8) e cinco fontes auxiliares DC (baterias).

Figura 11 Sistema teste de 7 barras



Fonte: Adaptado de (STACCHINI DE SOUZA *et al.*, 2004).

Na Tabela 1 é apresentada os alarmes recebidos pelo sistema SCADA, que representam os dados de entrada para cada uma das simulações realizadas usando os modelos implementados. Cenários de faltas múltiplas são apresentados para avaliar o desempenho dos modelos propostos, em condições de difícil resolução, devido à atuação das proteções de segunda zona, que protegem várias seções do sistema.

Tabela 1 Cenários de falta múltiplas para simulações

Dados de entrada obtidos do Sistema SCADA		
No	Funções de proteção do relé	Disjuntores
1	MP4, MP5	CB4, CB5
2	DP1, BP13	CB1, CB2, CB4, CB13
3	DP3, MP6, MP7, BP6	CB6, CB8, CB9
4	DP1, BP5, BP6, BP7, BP11, BP12	CB1, CB3, CB5, CB6, CB7, CB11, CB12
5	DP2, MP4, MP5, MP8, MP14, BP4, BP7.	CB4, CB7, CB8.
6	DP6, MP2, BP5, BP8, BP10, BP11, BP12, BP13	CB2, CB5, CB8, CB10, CB11, CB12, CB13, CB15

7	DP7, MP3, MP6, MP13, BP6, BP8, BP14, BP16.	CB3, CB6, CB14, CB16.
8	DP1, MP14, MP17, BP4, BP6, BP8, BP11, BP16, BP17	CB1, CB3, CB4, CB6, CB8, CB11, CB14, CB16, CB17.
9	DP1, DP2, DP3, DP4, MP5, BP1, BP4, BP5, BP11,	CB1, CB3, CB4, CB6, CB7, CB8, CB11, CB12, CB13, CB16
10	DP2, DP5, DP7, MP3, MP4, MP5, MP6, MP7, MP8, MP13, BP10, BP11, BP12, BP14, BP16.	CB3, CB5, CB6, CB7, CB10, CB11, CB12, CB13, CB14, CB16, CB17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para cada cenário de falta. Na coluna 2 a 7 são mostrados as seções em falta e o valor da função objetivo para cada caso, respectivamente.

Tabela 2 Diagnóstico de falta fornecidas pelas metodologias implementadas.

Caso	Diagnóstico de seção em falta				Tempo(s)			
	Barra	Linha	Fonte DC	Disjuntores	FO	PLIB	PNLIB	AGA
1	-	L1	-	-	1	0,093	0,296	0,01
2	A	-	-	CB3	1	0,109	0,312	0,01
3	C	L2	-	CB7	12	0,078	0,281	0,01
4	A	L2	-	CB2, CB4	22	0,062	0,296	0,01
5	B	L1, L6	G	CB5, CB6, CB14	24	0,062	0,312	0,01
6	A, F	L4	-	CB14	33	0,078	0,296	0,01
7	G	L2, L5, L6	D	CB8, CB13, CB17	75	0,062	0,296	0,01
8	A, B, C, F	L6, L8	E	CB8	67	0,062	0,326	0,01
9	A, B, C, D	L1, L5	-	CB2, CB5, CB9, CB10	46	0,078	0,281	0,01
10	B, E, G	L1, L2, L5, L6	-	CB4, CB8	37	0,093	0,281	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, torna-se evidente que com o AGA se obteve melhor tempo de processamento. Vê-se, pois, que para todos os casos, as soluções obtidas foram obtidas pelas três metodologias, aliás, encontraram o diagnóstico de falta correto. Logo, é indiscutível o fato de que os métodos propostos encontraram o mesmo valor da função objetivo que o AGA e provaram ser rápido sem a necessidade de calibrar nenhum parâmetro.

Devido à natureza do modelo PNLIB, é necessário o uso de software de otimização não linear. O uso deste tipo de método de otimização pode obter soluções quase ótimas quando é usado para resolver problemas de otimização combinatória complexos. Portanto, com a reformulação do modelo em um PLIB, torna-se um método melhor para resolver o problema. O PLIB foi avaliado para cada um dos dez testes e apresentou os mesmos resultados que o PNLIB, porém o modelo PLIB teve um esforço computacional menor que o PNLIB.

1.1.14 Estudo de caso: simulação 10

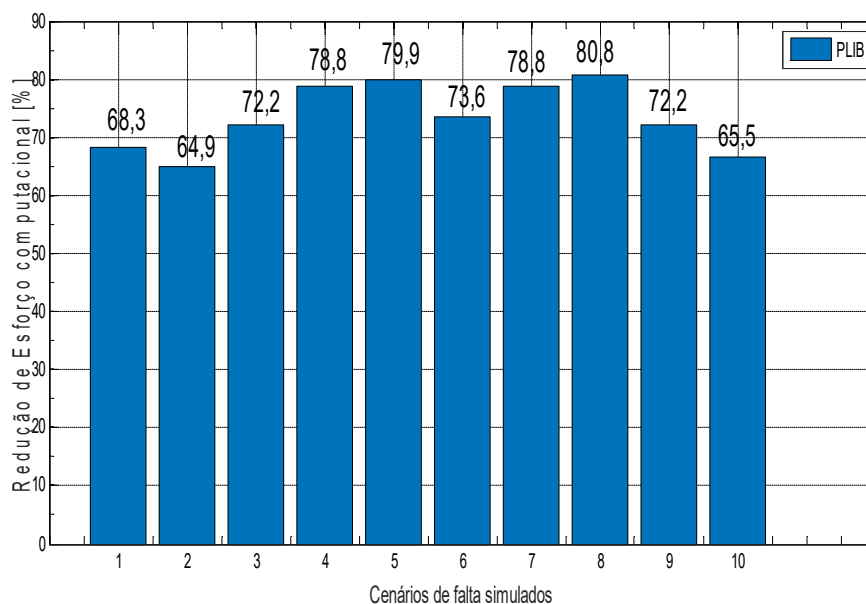
Nesta subseção, o cenário de falta 10 é analisado considerando a filosofia de proteção adotada neste trabalho. Portanto, tem-se que a atuação do relé diferencial DP2 envia um sinal de *trip* para que os disjuntores CB5 e CB6 abram devido a uma falta na barra B. A atuação da proteção principal dos relés de distância MP4 e MP5 e o consequente acionamento do disjuntor CB5 confirma uma falta na linha L1. Observa-se também que o relé MP4 foi acionado devido a essa falta, mas o disjuntor CB4 não abriu, logo se pode dizer que existe um defeito neste disjuntor. Como não abriu o disjuntor CB4 houve a atuação da proteção secundária da linha L1, ou seja, atuação dos relés de distância BP10, BP11 e BP12 enviando um sinal de *trip* para que os disjuntores CB10, CB11 e CB12 abram, respectivamente, de modo a isolar o defeito do restante do sistema. De forma análoga, houve a atuação da proteção principal dos relés de distância MP6 e MP7 os quais enviaram um sinal para que os disjuntores CB6 e CB7 abram, respectivamente, evidenciando que existe uma falta na linha L2. A função de proteção diferencial DP5 atuou, pois ela é responsável pela proteção principal da barra E e pela abertura dos disjuntores CB12 e CB13. Além disso, MP3 e MP13 atuaram devido a uma falta na linha L5, portanto, causando a abertura de CB3 e CB13, respectivamente. Além disso, há uma falta na linha L6, devido à atuação de MP8 e BP14, que são a proteção principal e secundária, respectivamente. No entanto, devido ao funcionamento indevido do disjuntor CB8, o BP16 atua e, portanto, envia *trip* para a abertura de CB16. Finalmente, DP7 atua e envia um sinal de *trip* para CB16 e CB17, para isolar a falta existente na barra G.

1.1.15 Desempenho do PLIB

Na Figura 12 é apresentada a redução do esforço computacional obtido pelo PLIB proposto, considerando todos os cenários de falta simulados.

No caso 2, o cenário de falta consiste na atuação das funções de proteção DP1 e BP13, e pela abertura dos disjuntores CB1, CB2, CB4 e CB13. Portanto, observa-se que o modelo PLIB atingiu a solução ótima do problema com 64,9% menos tempo de processamento do que o modelo PNLIB. No caso 8, são consideradas as atuações das funções de proteção DP1, MP14, MP17, BP4, BP6, BP8, BP11, BP16, BP17, que representam a atuação da proteção de primeira e segunda zona. Portanto, observa-se que, com o uso do modelo PLIB, foi obtido uma redução de 80,82 % no esforço computacional. Portanto, o modelo PLIB fornece um diagnóstico correto para todos os casos, garantindo a solução ótima do problema com tempo de processamento reduzido.

Figura 12 Redução do esforço computacional pelo método proposto.

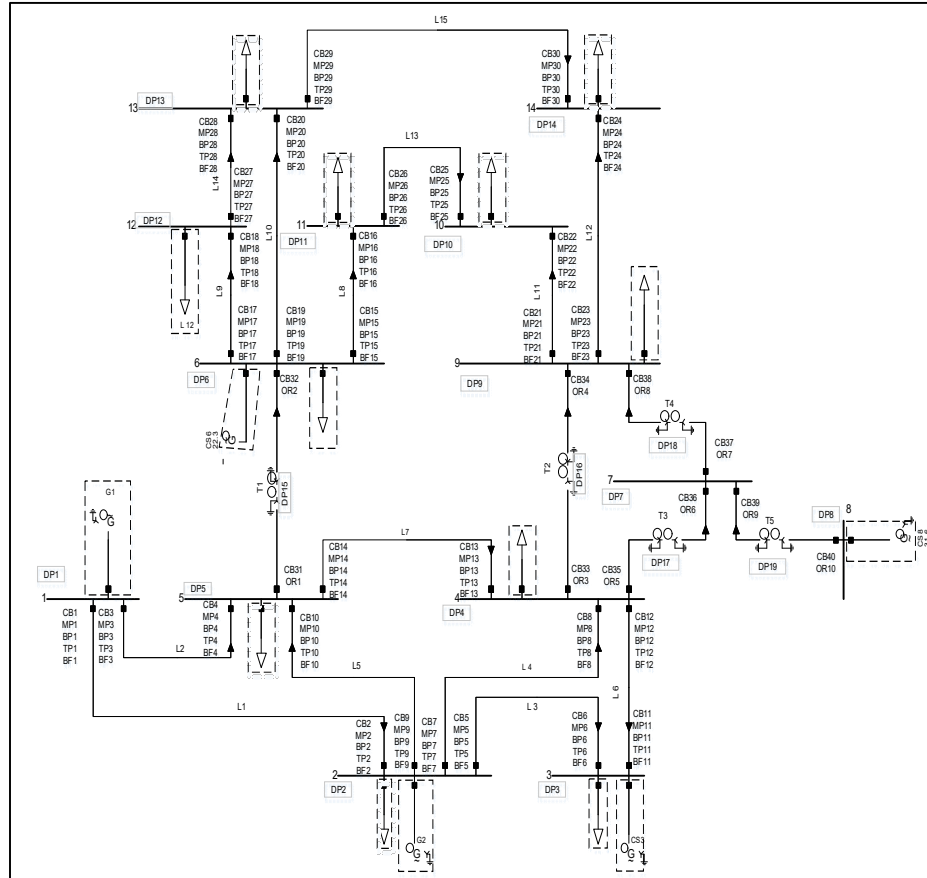


Fonte: Elaborado pelo autor.

C. SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS

O sistema de 14 barras utilizado, ilustrado na **Figura 13**, possui as seguintes características: funções de relés de proteção $n_f=159$; 40 disjuntores e 34 seções divididas em 14 barras (1-14), 15 linhas de transmissão (L1-L15), 5 transformadores (TF1-TF5) e 14 fontes auxiliares DC (baterias).

Figura 13 Sistema teste de 14 barras



Fonte: Adaptado de (DAMCHI; SADEH; MASHHADI, 2016).

Na Tabela 3 são apresentados os alarmes recebidos dos sistemas SCADA, que representam os dados de entrada para cada uma das simulações realizadas a partir das metodologias implementadas. Na primeira coluna são apresentados os dez cenários de falta que foram simulados empregando as metodologias propostas. A segunda coluna contém o conjunto de funções de proteção que atuam segundo o relatório do centro de controle. A terceira coluna apresenta o conjunto de disjuntores do sistema elétrico que atuam após um sinal de *trip* enviados pelas funções de proteção do sistema.

Tabela 3 Alarmes reportados pelo sistema SCADA

Dados de entrada obtidos do Sistema SCADA	
Caso	Funções de proteção do relé
	Disjuntores

1	DP1, DP2, DP6, DP11, DP13.	CB1, CB2, CB5, CB7, CB9, CB15, CB16, CB17, CB19, CB20, CB26, CB28, CB32.
2	DP1, DP3, DP8, MP9, MP10, MP13, MP14, MP15, MP16.	CB1, CB3, CB6, CB9, CB11, CB13, CB14, CB15, CB16, CB40.
3	DP9, DP14, MP15, MP16, MP27, MP28, MP29, BP5, BP6.	CB5, CB6, CB15, CB16, CB23, CB27, CB30, CB34, CB38.
4	DP5, DP12, BP16, BP17, TP7, TP8, TP11, TP12.	CB4, CB7, CB8, CB10, CB12, CB14, CB16, CB17, CB31.
5	DP12, DP15, DP17, DP19, BP8, BP11, OR5, OR6, TP10, TP13, TP14.	CB8, CB11, CB14, CB10, CB13, CB27, CB31, CB32, CB35, CB36, CB39, CB40.
6	DP16, BP24, BP25, OR3, OR4, OR7, OR8, TP8, TP19, TP20.	CB8, CB19, CB20, CB24, CB25, CB33, CB34, CB37, CB38.
7	DP2, DP4, BP15, BP12, BP23, TP7, TP29, TP30, TP27, TP28.	CB2, CB5, CB7, CB15, CB12, CB23, CB27, CB28, CB29, CB30
8	DP7, DP8, DP17, OR5, BP23, BP24, TP29, TP15, TP16, TP9, TP10	CB9, CB10, CB15, CB16, CB23, CB29, CB36, CB37, CB39, CB 40
9	DP6, DP10, DP12, BP10, BP11, MP5, MP6, TP11, TP12, TP13	CB5, CB6, CB10, CB11, CB12, CB13, CB17, CB18, CB19, CB22
10	DP3, DP5, DP6, BP19, BP20, TP30, TP27	CB3, CB4, CB10, CB14, CB19, CB20, CB30, CB27, CB31

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4 e Tabela 5 são apresentados resultados obtidos para cada cenário de falta. Nas colunas 2 a 7 são mostrados as seções em falta e o valor da função objetivo para cada caso, respectivamente.

Tabela 4 Diagnóstico de falta com o modelo PLIB

Caso	Diagnóstico de seção em falta						Tempo (s)
	Barra	Linha	Trafo	Fonte DC	Disjuntor	FO	PLIB
1	B1, B2, B6, B11, B13	-	-	9	3, 29	6	0,170
2	B1, B3, B8	L5, L7, L8	-	-	10	96	0,202
3	B9, B14	L3, L9, L14, L15	-	10	21, 24, 28, 29	207	0,218
4	B3, B6, B12	L6	-	10, 13, 14	11, 16, 18, 27	108	0,178
5	B2, B4, B12	L5	T1, T3, T4	1, 2, 6, 9	18, 38, 39, 40	111	0,1923
6	B3, B4, B9, B11, B14	-	T2, T4	2, 3, 5, 11	-	121	0,218
7	B2, B3, B4, B6, B11, B14	L15	-	1, 3, 5, 10, 11	8, 9, 13, 33, 35	172	0,218
8	B7, B8	L5, L8, L12, L15	T3	10	24, 35	188	0,281
9	B2, B6, B10, B12,	L3, L6,	-	1, 11, 13	15, 25, 27, 32	129	0,281

10	B3,B5,B6	L10,L14, L15	-	2,4,10,11	3,6,11,15, 17,32	180	0,234
-----------	----------	-----------------	---	-----------	---------------------	-----	-------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 Diagnóstico de falta com o modelo PNLIB e AGA.

Caso	Barra	Linha	Trafo	Diagnóstico de seção em falta			Tempo(s)	
				Fonte DC	Disjuntor	FO	PNLIB	AGA
1	B1, B2, B6, B11,	-	-	9	3, 29	6	0,24	0,03
2	B1,B3,B 8	L5,L7,L8	-	-	10	96	0,452	0,03
3	B9,B14	L3,L9,L14, L15	-	10	21,24,28,29	207	0,492	0,03
4	B3,B6,B 12	L6	-	10,13,14	11,16,18,27	108	0,440	0,03
5	B2,B4,B 12	L5	T1,T3,T4	1,2,6,9	18,38,39,40	111	0,671	0,03
6	B3,B4,B 9,B11,	-	T2,T4	2,3,5,11	-	121	0,66	0,03
7	B2,B3, B4,B11, B14	L14, L15	-	1,3,5,10, 11	8,9,13,33,35	182	0,46	0,03
8	B7,B8	L5,L8,L12,L 15	T3	10	24,35	188	0,35	0,03
9	B2,B6,B 10,B12,	L3, L6,	-	1,11,13	15,25,27,32	129	0,48	0,03
10	B3,B5,B 6	L10,L14, L15	-	2,4,10,11	3,6,11,15,17, 32	180	0,534	0,03

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar no caso 7, que o modelo PLIB estimou como em falta a barra 7, pelo contrário do modelo PNLIB e o AGA, mas, em cima disso, a função objetivo foi maior no AGA e PNLIB, devido a inconsistências ao estimar diferentes seções em falta que o modelo linear. Finalmente, vê-se pois, as metodologias estimam mesmo número de seções em falta, porém, distintas, portanto, isso explica o maior valor obtido pelo modelo PNLIB e o AGA. Na Tabela 4, verifica-se que o modelo PLIB obteve a solução ótima para o problema de diagnóstico de faltas. No caso 7, só o modelo PLIB encontrou o menor valor da função objetivo e, portanto, o diagnóstico de falta com maior probabilidade de ocorrer. Vê-se, pois, que além de resolver o problema de diagnóstico de faltas, o modelo PLIB foi eficiente para obter em um tempo computacional menor que o modelo não linear.

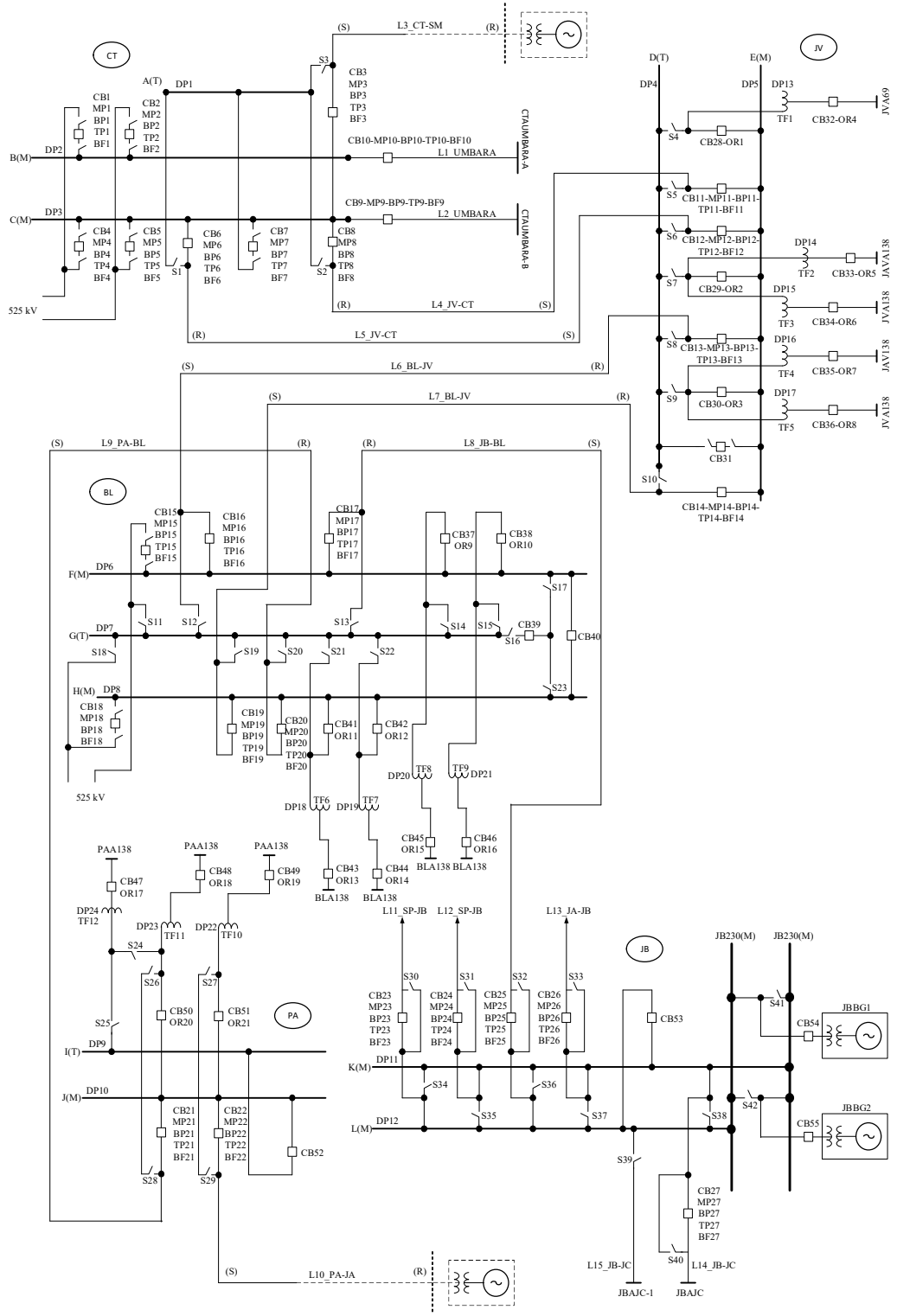
1.1.16 Estudo de caso: Simulação 5

Uma análise do cenário de falta é realizado considerando a atuação das funções de proteção do relé e os disjuntores alocados no sistema teste. Para este caso, a atuação da função de proteção diferencial DP12, envia uma sinal de trip para os disjuntores CB18 e CB27 abrirem. Portanto, existe uma falta na barra 12. Aliás, a não abertura do disjuntor CB18, indica que há uma falha nesse disjuntor. Observa-se também que nenhuma das funções de retaguarda da barra 12 situadas na subestação 6 atuaram, quando deveriam, por tanto há uma falha na bateria 6. Note-se que a função de proteção DP17, OR5 e OR6 atuaram, aliás, os disjuntores CB35 e CB36 atuaram, devido a uma falta no transformador T3. Existe uma falta na linha L5, desde que atuou a função de proteção secundária BP8, e abriram os disjuntores CB5 e CB8 respectivamente. Como não houve a atuação de nenhuma função de proteção principal da linha 5, portanto, existe uma falha na bateria 2. Existe uma falta na barra 2, desde que a proteção terciária TP13 atuou, porém não houve nenhuma atuação das funções de proteção relacionadas a subestação 1, portanto, há uma falha na bateria 1. Devido ao defeito na barra 4, a função TP14 atua, abrindo o disjuntor CB14 e isolando a falta. É importante ressaltar que há uma falta no transformador T1, devido à atuação da função de proteção diferencial DP15 e à abertura de CB31 e CB2, respectivamente. A função de proteção DP19 atuou, porém, os disjuntores CB39 e CB40 falharam, desde que não abrirem para isolar a falta. Por essas razões o disjuntor CB37 abre e existe uma falta no transformador T4. Devido à falta no transformador T4, o disjuntor CB38 teve que abrir, não entanto, CB38 falhou, aliás nenhuma proteção relacionada a subestação 9 atuou, portanto, é importante considerar que existe uma falta na bateria da subestação 9.

D. SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA SUL BRASILEIRO

O sistema elétrico considerado faz parte do sistema da Eletrosul (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010). O sistema elétrico é composto de cinco subestações: Curitiba (CT), Joinville (JV), Blumenau (BL), Palhoça (PA) e Jorge Lacerda B (JB). O sistema está interligado em 230 kV com as subestações Umbará (UM), Jorge Lacerda A (JA), Jorge Lacerda C (JC), São Mateus do Sul (SM) e Siderópolis (SP).

Figura 14 Sistema teste de parte do sistema sul brasileiro.



Fonte: Adaptado de (LEÃO; PEREIRA; MANTOVANI, 2010).

Tabela 6 Cenários de falta para as simulações

Dados de entrada obtidos do Sistema SCADA		
Caso	Funções de proteção do relé	Disjuntores
1	DP3	CB6
2	DP3, BP11, BP12	CB6, CB9, CB11, CB12
3	BP11, BP12	CB6, CB9, CB11, CB12
4	DP5, DP13, BP8, BP19, OR2, OR5	CB8, CB12, CB13, CB19, CB28, CB30, CB32, CB33
5	MP8, MP11, BP6, BP16, BP19, OR1, OR2, OR3, OR4	CB6, CB8, CB11, CB16, CB19, CB28, CB29, CB30, CB32
6	DP8, MP14, MP27, BP16, BP19, BP21, BP25, OR1, OR2, OR3, OR9, OR10,	CB16, CB19, CB21, CB25, CB28, CB29, CB30, CB37, CB38, CB41, CB42.
7	DP6, DP11, DP18, DP20, MP20, MP27, BP14, BP20, BP21	CB14, CB16, CB17, CB21, CB24, CB26, CB27, CB37, CB38, CB40, CB41, CB43, CB53
8	DP22, MP22, BP21, BP25, OR9, OR10, OR11, OR12	CB21, CB22, CB25, CB37, CB38, CB41, CB42, CB49, CB51.
9	DP10, DP22, MP20, MP21, MP22, OR19	CB20, CB52,
10	DP13, MP6, MP9, BP6, BP9, BP12, BP16, BP19, OR2, OR5.	CB9, CB16, CB19, CB28, CB29, CB32, CB33.
11	DP3, BP19,	CB8
12	DP3, DP5, DP14, BP20	CB6
13	MP11, MP17, BP13	CB8
14	MP13, MP26, BP16, TP17	-
15	MP8, MP11, BP16, BP19, OR1, OR2, OR3, OR4	CB6, CB8, CB11, CB16, CB19, CB28, CB29, CB30, CB32.
16	DP12, BP16, TP13, TP17	CB13
17	BP14, TP6, TP20, OR20	CB6
18	MP20, MP21, BP6, TP19, OR11, OR19	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema teste utilizado, ilustrado na Figura 14, possui uma quantidade de funções de relés de proteção $nf=153$ e número de seções $ns=43$. Possui 55 disjuntores e 43 seções divididas em 12 barras (A-L), 14 linhas de transmissão (L1-L14), 12 transformadores (TF1-TF12) e 5 fontes auxiliares DC (baterias). Na Tabela 6 são apresentados os alarmes recebidos dos sistemas SCADA, que representam os dados de entrada para cada uma das simulações realizadas a partir das metodologias implementadas. Na primeira coluna apresentam-se os dezoito cenários de falta que foram simulados empregando cada uma das técnicas de solução. A segunda coluna contém o conjunto de funções de proteção que atuaram segundo o relatório do centro de controle. A terceira coluna apresenta o conjunto de disjuntores do sistema elétrico que atuaram após um sinal de *trip* enviado pelas funções de proteção do sistema. Na

Tabela 6 são apresentados cenários de falta única e múltipla sendo que as simulações dos casos de múltiplas faltas apresentam menor probabilidade de ocorrência na prática, porém são uteis para avaliar o desempenho do modelo matemático em condições de difícil resolução principalmente devido a atuação das proteções de distância de segunda e terceira zona que protegem diversas seções do sistema elétrico.

Os resultados obtidos a partir dos cenários simulados são apresentados na Tabela 7. Da coluna 2 até a coluna 6 são apresentadas as seções sob falta, os disjuntores com falha e o valor da função objetivo para cada teste, respectivamente.

Tabela 7 Diagnóstico de falta a partir das metodologias implementadas.

(Continua)

Caso	Diagnóstico de seção em falta						Tempo(s)		
	Barra	Linha	Trafo	Fonte DC	Disjuntores	FO	PLIB	PNLIB	AGA
1	C	-	-	JV, BL, JB	CB3, CB8, CB9	14	0,156	0,792	0,02
2	C	L5	-	BL, JB	CB3, CB8	44	0,171	0,752	0,02
3	C	L5	-	CT, BL, JB	CB6, CB9	15	0,1562	0,792	0,02
4	E	-	TF1, TF2	PA	CB11, CB14, CB29	34	0,140	0,651	0,02
5	E	L4	TF1	PA	-	64	0,171	2,435	0,02
6	E, H	L7	-	CT	CB14, CB20, CB40	114	0,156	2,74	0,02
7	F, K	L9, L14	TF6, TF8	CT	CB20, CB45	67	0,171	0,812	0,03
8	H	L10	TF10	CT, JV	-	45	0,156	2,68	0,03
9	J	L9, L10	TF10	CT, JV	CB21, CB22, CB49, CB50, CB51	106	0,156	0,78	0,03
10	-	L2, L5	TF1, TF2	PA, JB	CB6, CB12	1096	0,187	0,75	0,03
11	C	L4	-	JV, PA, JB	CB3, CB6, CB9, CB19, CB20	95	0,218	2,291	0,02
12	C, E	L 10	TF2	PA, JB	CB3, CB8, CB11, CB12, CB13, CB14, CB20, CB28, CB29, CB30, CB33	226	0,25	2,51	0,02

Diagnóstico de falta a partir das metodologias implementadas (conclusão)									
Diagnóstico de seção em falta							Tempo(s)		
Caso	Barra	Linha	Trafo	Fonte	Disjuntores	FO	PLIB	PNLIB	AGA
13	C	L4, L8	-	DC CT, JB	CB11, CB13, CB17	134	0,171	2	0,02
14	-	-	L6, L8, L13	-	CB13, CB16, CB26	294	0,343	0,823	0,02
15	E	L4	TF1	PA	CB12, CB13, CB14, CB23, CB25, CB26, CB29, CB53	64	0,156	2,24	0,02
16	L	L6, L8	-	CT, PA	CB16, CB23, CB25, CB53	165	0,140	0,76	0,02
17	L	L9	TF11	-	CB14, CB50	162	0,281	2	0,02
18	E, F	L9	-	JV, JB	CB6, CB8, CB13, CB17, CB24, CB26, CB27, CB53	195	0,328	3,2	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um solver é um programa computacional que resolve o problema matemático e, além disso, tem algoritmos para resolver diferentes tipos de problemas (modelos de programação linear, não linear com variáveis inteiras ou discretas) (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003). Certos problemas de otimização combinatória não podem ser facilmente linearizados e resolvidos através de métodos de programação matemática tradicionais. Solvers de programação restrita podem ser mais eficientes do que solvers de programação inteira mista para alguns tipos de problemas de otimização combinatória (CPLEX CP OPTIMIZER, 2016).

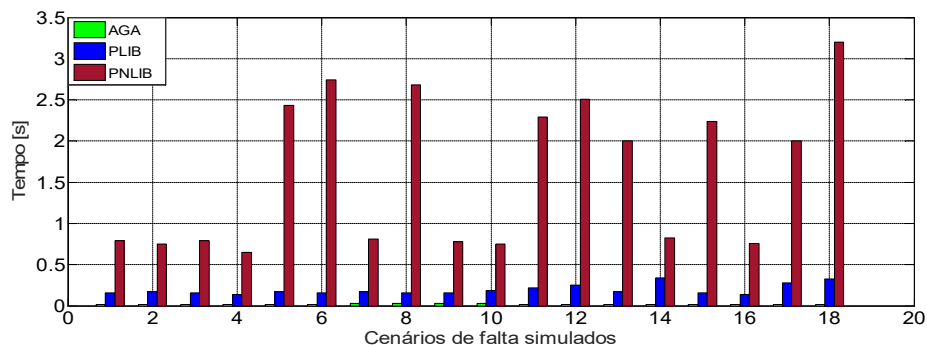
Para resolver o modelo de PNLIB foram utilizados diversos softwares de otimização para problemas não lineares como: Knitro (Nonlinear Interior-point Trust Region Optimizer), ILOG CP (IBM ILOG CPLEX CP Optimizer), Snopt (Sparse Nonlinear Optimizer) e o Conopt (Convex Nonlinear Optimizer). O Knitro é um software de otimização para problemas de programação não linear formulados com variáveis inteiras e contínuas e projetado para problemas de grande porte com muitas variáveis. O Snopt é um software de otimização para resolver problemas de otimização não linear que utiliza um algoritmo de programação quadrática sequencial esparsa. É especialmente eficaz para problemas não lineares em variáveis linear e quadrática; o

Conopt é eficiente e confiável para problemas altamente não lineares com restrições em variáveis contínuas. A partir do estudo realizado no artigo (ESCOTO; LEAO, 2018) concluiu-se que o ILOG CP apresentou o melhor desempenho em termos de tempo computacional e qualidade da função objetivo na resolução do problema convergindo em todos os casos para a solução mínima para o sistema da Figura 11. Conforme apresentado no artigo mostrou-se que com o Knitro nos casos 1 e 6 o modelo PNLIB não conseguiu convergir para o valor mínimo da função objetivo. No caso do Conopt o solver não conseguiu convergir nos casos 3 e 10 para o valor mínimo da função objetivo. Finalmente se conclui que para este sistema com uso do software Snopt foi que teve o pior desempenho, pois, nos casos 2, 5, 6, 7 e 10, ele não foi capaz de convergir ao valor mínimo encontrado. Devido que os solver têm técnicas de solução exatas, quando são utilizados para resolver problemas de otimização combinatória de grande porte e complexidade tendem a obter soluções ótimas locais. Desta forma para resolução do modelo PNLIB é utilizado o solver comercial IBM ILOG CPLEX CP Optimizer capaz de suportar uma grande variedade de tipos de restrições que podem conter expressões não lineares e expressões lógicas.

Diante do exposto acima, cabem alguns questionamentos: são esses diagnósticos corretos? A solução obtida é uma solução ótima? O método de diagnóstico proposto através do modelo de PNLIB apresentou tempo computacional razoável e encontrou a solução ótima? O modelo PNLIB é mais difícil de resolver e com explosão combinatória, além disso, o modelo PNLIB resolvido com solvers de otimização não linear, a solução, pode cair em ótimos locais. Portanto, com a reformulação do problema, em um modelo PLIB, que consiste na linearização exata das variáveis binárias do problema, torna-se um modelo equivalente e mais fácil de resolver.

O modelo PLIB foi avaliado para cada um dos dezoito testes, e apresentou os mesmos resultados que o AGA e o PNLIB, porém, o modelo PLIB não precisou da calibração de nenhum parâmetro (como o AGA) e teve um menor esforço computacional que o modelo PNLIB. Com os resultados obtidos pelo PLIB, pode-se garantir um diagnóstico correto e o ótimo do problema.

Figura 15 Comparativo do esforço computacional dos métodos em estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando os resultados obtidos na Tabela 7, é possível notar que em todos os testes o AGA, PNLIB e PLIB obtiveram a solução ótima para o problema. Na Figura 15 é apresentado o tempo de processamento para o AGA e os modelos matemáticos desenvolvidos. Por sua característica heurística o AGA foi o mais rápido dos três métodos, porém os resultados são altamente dependentes da calibração adequada dos parâmetros de controle do algoritmo. O AGA nos casos 3, 5 e 8, encontra soluções subótimas, ou seja, ótimos locais que representam um diagnóstico de faltas com uma menor probabilidade de ocorrer. No entanto, os testes realizados evidenciam o quanto o modelo matemático PLIB proposto pode ser vantajoso na resolução exata do problema de diagnóstico. Nesse sistema teste, verificou-se que o modelo de PLIB pode resolver o problema de forma eficiente em casos de múltiplas faltas, como pode ser observado em todos os testes realizados. Em todos os casos o modelo de PLIB apresenta um tempo computacional razoável para o problema (menor do que 0,5s) garantindo a solução ótima global para o problema sem qualquer calibração de parâmetros.

Diante desses resultados, pode-se dizer que o AGA atingiu o menor valor da função objetivo e obteve o melhor tempo de processamento para cada uma das simulações, no entanto, é necessário calibrar os dois parâmetros de controle. Ainda assim considera-se que o AGA é uma meta-heurística muito rápida e com boas soluções encontradas, porém, não se pode garantir para qualquer sistema que as soluções encontradas são os ótimos globais para qualquer conjunto de alarmes.

1.1.17 Estudo de caso: simulação 6

Tendo como base o sistema teste e a filosofia de proteção adotada, a solução obtida pelos métodos é considerada a melhor solução, porque sua análise permite estabelecer que é a mais confiável e segura para representar o estado esperado dos alarmes informados pelo sistema SCADA. Também é a solução que apresenta a menor quantidade de seções sob falta, o que está de acordo com o critério de parcimônia de minimalidade. A seguir é feita a análise detalhada da solução para a simulação 6: a atuação da função diferencial DP8 é devido uma falta na barra H. A função DP8 envia um sinal de *trip* para os disjuntores CB19, CB20, CB40, CB41 e CB42. Devido o disjuntor CB20 não abrir pode-se concluir que há falha nesse equipamento. Devido a falha no disjuntor CB20, a função de proteção de retaguarda do barramento H, ou seja, BP21, atua enviando sinal de *trip* para o disjuntor CB21. Além disso, as funções de sobrecorrente OR9, OR10 e de distância de retaguarda BP25 enviam sinal de *trip* para os disjuntores CB37, CB38 e CB25, respectivamente, a fim de isolar a falta na barra H. A função de distância MP14 atua devido à falta na linha L7 enviando sinal de *trip* para o disjuntor CB14. Devido o disjuntor CB14 não abrir conclui-se que existe uma falha neste equipamento. Devido a não abertura de CB14 a função de proteção de retaguarda da linha L7, BP16 atua, enviando *trip* ao disjuntor CB16 que por sua vez abre corretamente. Observa-se também que nenhuma das funções de retaguarda da linha L7 situadas na subestação CT atuaram, quando deveriam, e, portanto, há uma falha na bateria (controle) daquela subestação, conforme apresentado nos resultados. Uma vez que as funções de proteção OR1, OR2 e OR3 são as proteções de retaguarda do barramento E, os transformadores TF1 (OR1), TF2-TF3 (OR2), TF4-TF5 (OR3), e a proteção principal destas seções (DP5, DP13, DP14, DP15, DP16, DP17, respectivamente) não atuam é difícil apontar com precisão qual destas seções estão sob falta. A partir do ponto de vista de um operador é razoável supor que o barramento E apresenta mais probabilidade de estar sob falta do que os transformadores TF1-TF5 devido a atuação simultânea das funções de sobrecorrente OR1-OR3. Assim, a barra E é diagnosticada sob falta na solução 1. A função BP16 está associada tanto à barra E (CB14 falha) e a linha L7 (falha CB14 e CB13).

1.1.18 Estudo de caso: simulação 7

Tendo adotada a filosofia da proteção mencionada no capítulo 4, tem-se um diagnóstico correto para o caso da simulação 7 do sistema de energia elétrica da Figura 14 segundo a seguinte explicação: devido a atuação de DP6, há falta na barra F. Além disso DP6 envia um sinal de *trip* aos disjuntores CB16, CB17, CB37, CB38 e CB40 com o objetivo de isolar a falta. Logo, DP11 atua devido à existência de uma falta na barra K e envia um sinal de *trip* para que os disjuntores CB24, CB26, CB27 e CB53 abram. Além disso, a função principal MP27 atua devido a uma falta na linha L14 e esta função envia um sinal de *trip* ao disjuntor CB27 para isolar a falta. As funções DP18 e DP20 atuam enviando *trip* aos disjuntores CB41, CB43, CB37 e CB45, devido uma falta nos transformadores TF6 e TF8, respectivamente. Como CB45 não abriu, é provável que haja uma falha nesse disjuntor. A função MP20 atua enviando sinal de *trip* ao disjuntor CB20 para isolar a falta na linha L9. Devido a não abertura de CB20, as funções de retaguarda de segunda zona, BP20 e BP14 atuam. Também BP21 atua para abrir o disjuntor CB21 para isolar a falta na linha L14. Baseado nesta explicação pode-se concluir com certeza que existem faltas na barra F e K; linhas L9 e L14; transformadores TF6 e TF8 e falhas nos disjuntores CB20 e CB45.

1.1.19 Desempenho do PLIB

Para validar o desempenho superior do modelo PLIB em relação ao modelo PNLIB proposto, apresenta-se na Tabela 8 o desempenho computacional para os modelos propostos considerando todos os cenários de falta.

Tabela 8 Comparação do esforço computacional entre PNLIB e PLIB.

(Continua)

Caso	PLIB(s)	PNLIB(s)	Diferença(s)	PLIB/PNLIB (%)	Redução de esforço computacional (%)
1	0,156	0,792	0,636	19,696	80,30
2	0,171	0,752	0,581	22,739	77,26
3	0,1562	0,792	0,6358	19,7222	80,277
4	0,14	0,651	0,511	21,505	78,49
5	0,171	2,435	2,264	7,022	92,97
6	0,156	2,74	2,584	5,693	94,30

Caso	PLIB(s)	PNLIB(s)	Diferença(s)	PLIB/PNLIB (%)	Redução de esforço computacional (%)
7	0,171	0,812	0,641	21,059	78,94
Comparação do esforço computacional entre PNLIB e PLIB					(Conclusão)
8	0,156	2,68	2,52	5,82	94,17
9	0,156	0,78	0,62	20,00	80,00
10	0,187	0,75	0,563	24,93	75,06
11	0,218	2,291	2,07	9,51	90,48
12	0,250	2,51	2,26	9,960	90,03
13	0,171	2,00	1,829	8,55	91,45
14	0,343	0,823	0,48	41,67	58,32
15	0,156	2,24	2,084	6,96	93,03
16	0,140	0,76	0,62	18,42	81,57
17	0,281	2,00	1,71	14,05	85,95
18	0,328	3,20	2,87	10,25	89,7

Fonte: Elaboração do próprio autor

Comparando os resultados do modelo de PLIB com o tempo computacional obtido pelo modelo de PNLIB é possível notar que houve redução do tempo de processamento para todos os casos simulados. Portanto, o modelo de PLIB além de ter um diagnóstico correto e garantir a solução ótima do problema, apresenta-se como um método capaz de resolver o problema de diagnóstico de faltas em um tempo de processamento aceitável e pode ser uma ferramenta útil para os operadores dos centros de controle.

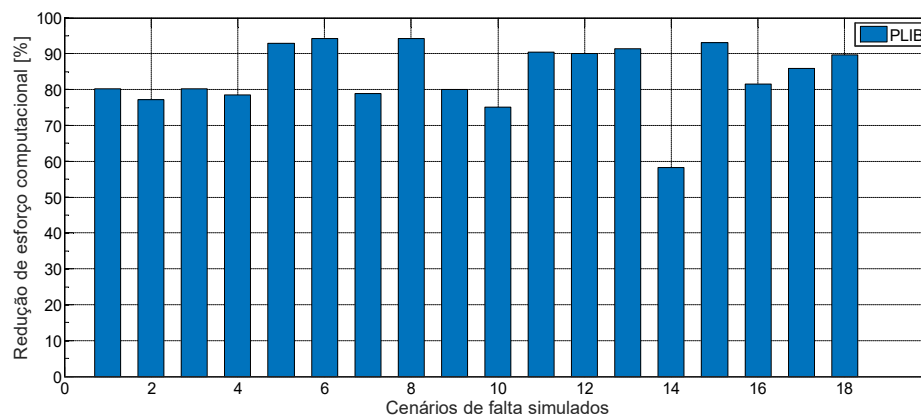
Os casos 5 e 6 são compostos por cenários de faltas múltiplas. Nestes casos o modelo de PLIB obteve a maior redução de esforço computacional sendo de 92,97% para o caso 5 e 94,30% para o caso 6.

Nos casos 7 e 8 o modelo de PLIB apresentou um tempo de processamento de 0,171s e 0,156s, respectivamente, o que significa uma redução de 78,94% e 94,17% do tempo computacional empregado pelo modelo de PNLIB para encontrar a solução ótima para cada um desses casos.

Os resultados mostram, para os testes 9 e 10, que com o uso do modelo de PLIB obteve-se uma redução do esforço computacional de 80% e 75,06% respectivamente. Para esses casos a diferença de tempo de processamento em que ambos modelos conseguiram a solução ótima foi de 0,156s e 0,187s respectivamente.

Na Figura 16 é apresentado em forma gráfica a redução dos tempos de processamento para todos os casos de falta constantes na Tabela 8.

Figura 16 Redução de tempo de processamento entre PNLIB e PLIB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diversas simulações realizadas para os casos 11 e 12 resultaram que o modelo de PLIB oferece para ambos casos uma redução de cerca de 90% do esforço computacional. Vê-se, pois, que nestes cenários de falta o modelo de PLIB conseguiu a solução ótima do problema de forma eficiente e rápida.

Nos casos 13 e 14 o modelo de PLIB empregou apenas 8,55% e 41,676% do tempo de processamento utilizado pelo modelo de PNLIB. Para o segundo caso, nota-se que a atuação das funções de proteção MP13, MP26, BP16, TP6, TP12, e TP17, que representam a atuação das proteções de primeira, segunda e terceira zona do modelo constituindo um cenário de falta complexo o modelo matemático linear encontrou a solução ótima com a menor diferença percentual, ou seja, 58,32% em relação ao tempo do modelo matemático não linear.

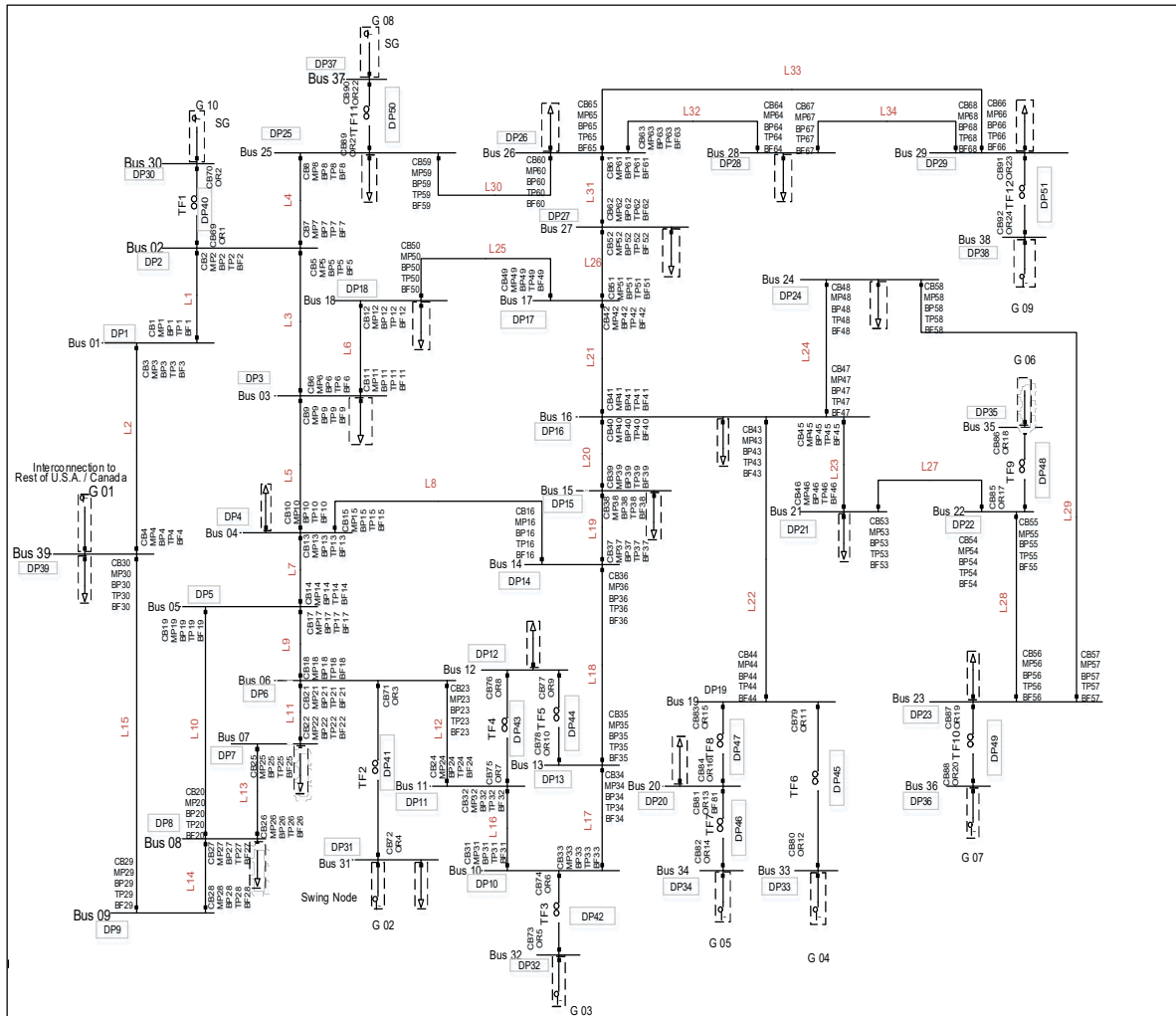
E. SIMULAÇÕES E TESTES PARA O SISTEMA DE 39 BARRAS

Finalmente, para validar os métodos propostos, é empregado o sistema teste chamado IEEE-39 New England, usado em (MARCOLINO; LEITE; MANTOVANI, 2015) ilustrado na

Figura 17. Este sistema é composto de funções de relés de proteção $n_f=371$, número de seções $n_s=85$ e possui 92 disjuntores. Portanto, as 85 seções são divididas

em 39 barras (1-39), 34 linhas de transmissão (L1-L34), 12 transformadores (TF1-TF12) e 39 fontes auxiliares DC (baterias).

Figura 17 Sistema teste IEEE 39 Barras



Fonte: Adaptado de (MARCOLINO; LEITE; MANTOVANI, 2015).

Na Tabela 9 são apresentados os alarmes recebidos do sistema SCADA, que representam os dados de entrada para cada uma das simulações realizadas a partir das metodologias implementadas. Na primeira coluna são apresentados os dez cenários de falta que foram simulados empregando as metodologias propostas. A segunda coluna contém o conjunto de funções de proteção que atuam segundo o relatório do centro de controle. A terceira coluna apresenta o conjunto de disjuntores

do sistema elétrico que atuaram após um sinal de *trip* enviados pelas funções de proteção do sistema.

Tabela 9 Alarmes reportados pelo sistema SCADA

Dados de entrada obtidos do Sistema SCADA		
Caso	Funções de proteção do relé	Disjuntores
1	DP4, DP14, DP15, DP18, DP21, DP25, DP32, DP34, DP37.	CB8, CB10, CB15, CB36, CB37, CB38, CB39, CB50, CB59, CB73, CB82, CB89, CB90.
2	DP1, DP4, DP17, MP9, MP10, MP41, MP42, MP49, MP50, BP5, BP12.	CB1, CB5, CB10, CB12, CB13, CB15, CB16, CB41, CB42, CB49, CB50, CB51.
3	DP6, DP9, DP39, MP15, MP16, MP33, MP34, MP47, MP48, BP26, BP36, TP13.	CB4, CB15, CB26, CB28, CB29, CB30, CB33, CB36, CB47, CB48, CB71.
4	DP2, DP18, DP40, DP50, MP41, MP42, TP57, TP58, TP61.	CB2, CB41, CB51, CB57, CB58, CB69, CB70, CB89, CB90.
5	DP46, OR5, OR6, OR11, OR12, TP38, TP58.	CB33, CB46, CB73, CB74, CB79, CB80, CB81, CB82.
6	DP23, DP49, DP51, OR23, OR24, TP15, TP16, TP51, TP63.	CB15, CB51, CB56, CB57, CB64, CB87, CB88, CB91, CB92.
7	DP14, DP22, DP24, BP5, BP6, TP33, TP44, TP58, TP67, TP68.	CB5, CB6, CB16, CB37, CB48, CB55, CB58, CB67, CB85.
8	DP3, DP7, DP8, BP14, BP30, TP10, TP41, TP53, TP63	CB1, CB14, CB25, CB26, CB30, CB45, CB61, CB65.
9	DP5, DP6, DP10, BP20, BP23, TP13, TP26, TP36.	CB18, CB20, CB21, CB31, CB33, CB74.
10	DP20, DP24, DP28, BP17, BP18, BP37, TP44, TP51, TP62	CB17, CB40, CB48, CB58, CB64, CB67, CB81, CB84.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os testes realizados com o sistema teste IEEE 39 barras permitem avaliar melhor o desempenho do modelo PLIB e servem para evidenciar a redução do tempo de resolução usando esse modelo quando comparado com o tempo de resolução do modelo PNLB. Na **Tabela 10**, são apresentados os resultados obtidos com o modelo PLIB. Na **Tabela 11** estão os resultados obtidos com o modelo PNLB e na **Tabela 12** são apresentados os resultados obtidos com o AGA.

Tabela 10 Diagnóstico de falta fornecido pelo modelo PLIB proposto.

No	Barra	Diagnóstico de seção em falta				Disjuntor	FO	Tempo
		Linha	Trafo	Fonte DC	(s)			
1	B4,B14,B15,B18,B21,B25,B32,B34,B37	-	-	3,5,6,8,16,23,24	12,13,16,46,53	36	0,203	
2	B1,B4,B17	L5,L21,L25	-	9,25,39	3,9	79	0,203	

3	B6,B7,B9,B39	L8,L17,L24	-	5,7,11,13,15	16,18,21	112	0,250
4	B2,B18	L21,L29,L31	T1,T11	3,4,27,28,29	5, 7, 42, 50, 51,61	162	0,281
5	B13	L27	T3,T6, T7	3,4,11,13, 14,21,22,23	33, 38, 46, 58	43	0,328
6	B13,B23,B26,B29,B38	L9	T10, T12	2,3,5,6,7,8, 10,11,13,15, 25,27,28	16, 63, 64	101	0,421
7	B14,B22,B24	L3,L22,L29,L31	-	13,15,16,17,18, 21,23,25,26,27	33, 36, 44, 54,68	137	0,281
8	B3,B7,B8,B9,B23,B27,B29	L5,L15	-	2,6,9,11,14,17,1 8,22,23,24,25,2 7,28,29	1, 6, 9, 10, 11, 20,22,27, 41,45,53, 61,63,65	183	0,30
9	B5,B6,B10	L7,L12,L13,L18	-	2,3,7,9,11,12,13 ,15,16,18	13,14,17, 19,23,26, 36,71	197	0,176
10	B20,B24,B25,B26,B28,B29	L9,L19,L20,L22 ,L33	-	2,7,8,11,13,15, 16,18,21,23,25, 26,29	18,37,40, 44,51,62	131	0,343

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 Diagnóstico de falta fornecido pelo modelo PNLIB

No	Barra	Diagnóstico de seção em falta				Disjuntor	FO	Tempo (s)	PNLIB
		Linha	Trafo	Fonte DC					
1	B4,B14,B15,B18,B21,B25, B32,B34,B37	-	-	3,5,6,8,16,22,23 ,24	12,13,16, 46, 53	37	0,234		
2	B1,B4,B17	L5,L21,L25	-	9,25,39	3,9	79	0,265		
3	B6,B7,B9,B39	L8,L17,L24	-	5,7,11,13,15	16,18,21	161	0,453		
4	B2,B18	L21,L29,L31	T1,T11	3,4,27,28,29	5, 7, 42, 50, 51,61	162	0,484		
5	B13	L27	T3,T6, T7	3,4,11, 14,21,22,23	33, 38, 46, 58	52	0,593		
6	B13,B23,B26,B29,B38	L9	T10, T12	2,3,5,6,7,8, 10,11,13,15, 25,27,28	16, 63, 64	101	0,646		
7	B14,B22,B24	L3,L22,L29,L31	-	13,15,16,17,18, 21,23,25,26,27	33, 36, 44, 54,68	137	0,421		
8	B3,B7,B8,B9,B23,B27,B29	L5,L15	-	2,6,9,11,14,17,1 8,22,23,24,25,2 7,28,29	1, 6, 9, 10, 11, 20,22,27, 41,45,53, 61,63,65	183	12,96		
9	B5,B6,B10	L7,L12,L13,L18	-	2,3,7,9,11,12,13 ,15,16,18	13,14,17, 19,23,26, 36,71	197	0,210		

10	B20,B24,B25,B26,B28,B29	L9,L19,L20,L22 ,L33	-	1,2,3,4,7,8,10, 11,13,15,16,18, 21,23,25,26,29	18,37,40, 44,51,62	178	0,859
-----------	-------------------------	------------------------	---	--	-----------------------	-----	-------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 Diagnóstico de falta fornecido pelo AGA

No	Barra	Diagnóstico de seção em falta				Tempo (s)	
		Linha	Trafo	Fonte DC	Disjuntor	FO	AGA
1	B4,B14,B15,B18,B21,B25, B32,B34,B37	-	-	3,5,6,8,16,22,23 ,24	12,13,16, 46, 53	37	0,19
2	B1,B4,B17	L5,L21,L25	-	9,25,39	3,9	79	0,22
3	B6,B7,B9,B39	L8,L17,L24	-	5,7,11,13,15	16,18,21	161	0,23
4	B2,B18	L21,L29,L31	T1,T11	3,4,27,28,29	5, 7, 42, 50, 51,61	162	0,23
5	B13	L27	T3,T6, T7	3,4,11, 14,21,22,23	33, 38, 46, 58	52	0,24
6	B13,B23,B26,B29,B38	L9	T10, T12	2,3,5,6,7,8, 10,11,13,15, 25,27,28	16, 63, 64	101	0,24
7	B14,B22,B24	L3,L22,L29,L31	-	13,15,16,17,18, 21,23,25,26,27	33, 36, 44, 54,68	137	0,24
8	B3,B7,B8,B9,B23,B27,B29	L5,L15	-	2,6,9,11,14,17,1 8,22,23,24,25,2 7,28,29	1, 6, 9, 10, 11, 20,22,27, 41,45,53, 61,63,65	183	0,28
9	B5,B6,B10	L7,L12,L13,L18	-	2,3,7,9,11,12,13 ,15,16,18	13,14,17, 19,23,26, 36,71	197	0,210
10	B20,B24,B25,B26,B28,B29	L9,L19,L20,L22 ,L33	-	1,2,3,4,7,8,10, 11,13,15,16,18, 21,23,25,26,29	18,37,40, 44,51,62	178	0,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos testes simulados com o modelo de PLIB, são obtidas as menores soluções (ótimas) da função objetivo para cada um dos cenários de falta. Além disso, o diagnóstico das seções em falta é correto. Essa verificação é feita através da filosofia de proteção adotada para o desenvolvimento das metodologias.

Os testes realizados evidenciam o quanto o modelo de PLIB proposto pode ser vantajoso na solução exata do problema de diagnóstico de falta. Neste sistema

verificou-se que o modelo de PLIB pode resolver o problema de forma eficiente, em casos de múltiplas faltas e complexos.

As simulações ressaltam, que o AGA e o modelo PNLB são ferramentas que podem ser usadas para resolver o problema de diagnóstico de faltas. No entanto, como foi evidenciado nos casos 1, 3, 5 e 10, pela grande complexidade do problema, em casos nos quais tem uma grande explosão combinatória, a resolução do problema por esses métodos podem ser menos eficiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO TRABALHO

A. CONCLUSÕES

Neste trabalho são propostos os modelos matemáticos de PNLB e PLIB para o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão de energia elétrica. Os modelos propostos são compostos de uma função objetivo baseada no critério de parcimônia de minimalidade e de um modelo matemático de operação do sistema de proteção que modela a filosofia de proteção utilizada no sistema elétrico protegido e a lógica da atuação da proteção. O modelo de PLIB é obtido através da linearização exata do modelo de PNLB a qual foi feita nos termos da função objetivo e nas equações do cálculo dos estados esperados das funções de proteção estabelecidas como restrições para o problema. As maiores vantagens de transformar o problema não linear em um problema linear inteiro binário é o menor esforço computacional requerido para resolver o problema, garantia da convergência para solução ótima global em cenários de falta múltipla sem a necessidade de calibrar parâmetros e a utilização de *solvers* comerciais de programação linear. Os resultados obtidos demonstram a eficiência do método proposto considerando a explosão combinatória deste problema de otimização. Também é mostrado que a solução ótima encontrada para o problema linear inteiro binário é também ótima para o problema não linear, demonstração realizada a partir das simulações de diversos cenários de faltas realizadas em um sistema teste da literatura.

Foi mostrado que o modelo de PLIB é uma ferramenta eficiente para estimar as seções em falta para cada um dos casos analisados. Finalmente, conclui-se que o problema de diagnóstico de faltas em sistemas de transmissão é um problema combinatório e que a resolução exata desse problema é difícil sendo que não há

trabalhos na literatura que resolvem o problema de forma estritamente exata, no entanto, o modelo de PLIB proposto foi eficiente para obter a solução ótima global em tempos computacionais adequados.

B. TRABALHOS FUTUROS

Adicionalmente aos estudos realizados no desenvolvimento desta tese, são feitas algumas sugestões de trabalhos futuros para tornar o modelo de otimização mais completo. Destacam-se como segue:

- Generalizar o modelo matemático, a fim de cada uma das restrições sejam explícitas, isto é, um modelo matemático completamente escalável e explícito;
- Implementar o modelo matemático para um sistema teste de maior porte, ou seja, que inclua mais seções e maior número de funções de proteção;

REFERÊNCIAS

- ALVES DA SILVA, A. P. P.; INSFRAN, A. H. F. H. F.; SILVEIRA, P. M. M.; LAMBERT-TORRES, G. Neural networks for fault location in substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n. 1, p. 234–239, 1996.
- ANDERSON, P. M. **Power system protection**. New York: IEEE: Wiley-Interscience, 1999.
- BEDEKAR, P. P.; BHIDE, S. R.; KALE, V. S. Fault section estimation in power system using Hebb's rule and continuous genetic algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Piscataway, v. 33, n. 3, p. 457–465, 2011.
- BI, T.; YAN, Z.; WEN, F.; NI, Y.; SHEN, C. M.; WU, F. F.; YANG, Q. On-line fault section estimation in power systems with radial basis function neural network. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Amsterdam, v. 24, n. 4, p. 321–328, mai. 2002.
- BIONDI NETO, L.; CHIGANER, L. Sistema especialista fuzzy no diagnóstico de falhas em transformadores. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15, 1999, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [s.n.], 1999. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2015/12/SISTEMA-ESPECIALISTA-FUZZY-NO-DIAGN%C3%93STICO-DE-FALHAS-EM-TRANSFORMADORES.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 35, n. 3, p. 268–308, 2003.
- CAMINHA, A. C. **Introdução a proteção dos sistemas eletricos**. São Paulo: Edgar Blucher, 1977.
- CARDOSO JR, G.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 215–229, 2004.
- CARDOSO JUNIOR, G.; ROLIM, J. G.; ZURN, H. H. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1034–1041, 2004.
- CARDOZO, E.; TALUKDAR, S. N. A distributed expert system for fault diagnosis. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 641–646, 1988.

CARNEIRO, M. E.; STELZER, G.; PILOTTO, M. J. Implantação de automatismo e monitoramento de transformadores em SE's desassistidas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15, 1999, Foz do Iguaçu. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu: [s.n.], 1999. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2015/12/IMPLANTA%C3%87%C3%83O-DE-AUTOMATISMO-E-MONITORAMENTO-DE-TRANSFORMADORES-EM-SE%C2%B4S-DESASSISTIDAS.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

CHEN, W.-H. Fault section estimation using fuzzy matrix-based reasoning methods. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 1, p. 205–213, 2011.

CHEN, W.-H.; TSAI, S.-H.; LIN, H.-I. Fault section estimation for power networks using logic cause-effect models. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 2, p. 963–971, 2011.

CPLEX CP Optimizer. 2016. Disponível em: <https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-cp-optimizer/>. Acesso em: 12 out. 2019.

CPLEX, I. I. Users' manual for CPLEX. [S.l.: s.n.], 2015, 594 p.

DABBAGHCHI, I.; GURSKY, R. J. R. J. An abductive expert system for interpretation of real-time data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 8, n. 3, p. 1061–1069, 1993.

DAMCHI, Y.; SADEH, J.; MASHHADI, H. R. Optimal coordination of distance and overcurrent relays considering a non-standard tripping characteristic for distance relays. **IET Generation, Transmission and Distribution**, London, v. 10, n. 6, p. 1448–1457, 2016.

DOS SANTOS FONSECA, W. A.; BEZERRA, U. H.; NUNES, M. V. A.; BARROS, F. G. N.; MOUTINHO, J. A. P. Simultaneous fault section estimation and protective device failure detection using percentage values of the protective devices alarms. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 1, p. 170–180, 2013.

ESCOTO, E. F.; FÁBIO BERTEQUINI, L. Fault section estimation in power systems using an adaptive genetic algorithm. In: IEEE/PES GENERAL MEETING 2016, Boston. **Proceedings** [of the...]. Boston: IEEE, 2016.

ESCOTO, E. F.; LEO, F. B. A nonlinear binary programming model for fault section estimation in electric power systems. In: 2017 IEEE INTERNATIONAL AUTUMN MEETING ON POWER, ELECTRONICS AND COMPUTING, ROPEC 2017 2018, Ixtapa. **Proceedings** [of the...]. Ixtapa: IEEE, 2018.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=8w3SygAACAAJ>. Acesso em: 15 dez. 2018.

FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. A modeling language for mathematical programming. **Management Science**, , v. 36, n. 5, Disponível em: <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.36.5.519>. Acesso em: 20 dez. 2019.

FRITZEN, P. C. **Estimação da seção em falta e processamento de alarmes em sistemas de potência utilizando um sistema híbrido fundamentado na heurística construtiva e na programação inteira**. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3677/FRITZEN%2c%20PAULO%20CERO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14 abr. 2020.

FRITZEN, P. C.; ZAUKE, J. M.; CARDOSO, G.; OLIVEIRA, A. D. L.; ARAÚJO, O. C. B. Hybrid system based on constructive heuristic and integer programming for the solution of problems of fault section estimation and alarm processing in power systems. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 90, p. 55–66, set. 2012.

FU, S. An expert system for on-line diagnosis of system faults and emergency control to prevent a blackout. *In*: IFAC CONTROL OF POWER PLANTS AND POWER SYSTEMS, 1995, Cancun. **Proceedings** [of the...]. Cancun: [s.n.], 1995. p. 303-308.

FUKUI, C.; KAWAKAMI, J. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 1, n. 4, p. 83–90, 1986.

FUSHUAN WEN; CHANG, C. S.; SRINIVASAN, D. Alarm processing in power systems using a genetic algorithm. *In*: PROCEEDINGS OF 1995 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 1995, Perth. **Proceedings** [of the...]. Perth: IEEE, 1995.

GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, Amsterdam, v. 13, n. 5, p. 533–549, 1986.

HANDSCHIN, E.; KUHLMANN, D.; HOFFMANN, W. System fault diagnosis. *In*: EL-SHARKAWI, M. A.; NIEBUR, D. (ed.). **System fault diagnosis**. [s.l.] : University of Dortmund, 1996. p. 138–149.

HE, Z.; CHIANG, H.-D.; LI, C.; ZENG, Q. Fault-section estimation in power systems based on improved optimization model and binary particle swarm optimization. *In*: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2009, Calgary. **Proceedings** [...]. Calgary: IEEE, 2009.

HEUNG-JAE, L.; BOK-SHIN, A.; YOUNG-MOON, P. A fault diagnosis expert system for distribution substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 92–97, 2000.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.**

Michigan: University of Michigan Press, 1975. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=JE5RAAAAMAAJ>. Acesso em: 18 jun. 2019.

HONG-TZER, Y.; WEN-YEAU, C.; CHING-LIEN, H. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 1, p. 220–230, 1994.

HONG-TZER, Y.; WEN-YEAU, C.; CHING-LIEN, H. On-line fault diagnosis of power substation using connectionist expert system. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 10, n. 1, p. 323–331, 1995.

HUANG, S. J.; LIU, X. Z.; SU, W. F.; OU, T. C. Application of enhanced honey-bee mating optimization algorithm to fault section estimation in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 28, n. 3, p. 1944–1951, 2013.

IEEE COMITE REPORT, I. Review of recent practices and trends in protective relaying. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-100, n. 8, p. 4054–4064, 1981.

JEYASURYA, B.; VENKATA, S. S.; VADARI, S. V.; POSTFOROOSH, J. Fault diagnosis using substation computer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 5, n. 2, p. 1195–1201, 1990.

LEÃO, F. B. **Metodologia para análise e interpretação de alarmes em tempo real de sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2011. 345 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia. Universidades Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. Disponível em:

https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100333/leao_fb_dr_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 14 abr. 2020.

LEÃO, F. B.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI, J. R. S. Fault section estimation in electric power systems using an optimization immune algorithm. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 80, n. 11, p. 1341–1352, 2010.

LEÃO, F. B.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI, J. R. S. Fast fault section estimation in distribution control centers using adaptive genetic algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 63, p. 787–805, 2014.

LIN, X.; KE, S.; LI, Z.; WENG, H.; HAN, X. A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm-tabu search. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 25, n. 3, p. 1268–1274, 2010.

LO, K. L.; NG, H. S.; TRECAT, J. Power systems fault diagnosis using Petri nets. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Piscataway, v. 144, n. 3, p. 231, 1997.

LO, K. L.; NG, H. S.; TRECOT, J. Extended Petri net models for fault diagnosis for substation automation. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Piscataway, v. 146, n. 3, p. 229, 1999.

MARCOLINO, M. H.; LEITE, J. B.; MANTOVANI, J. R. S. Optimal coordination of overcurrent directional and distance relays in meshed networks using genetic algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 13, n. 9, p. 2975–2982, 2015.

MASON, C. R. **The art & science of protective relaying**. 5. ed. New York: Bukupedia, 1956.

MIN, S. W.; SOHN, J. M.; PARK, J. K.; KIM, K. H. Adaptive fault section estimation using matrix representation with fuzzy relations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 842–848, 2004.

OLIVEIRA, A. L.; DE ARAÚJO, O. C. B.; CARDOSO, G.; DE MORAIS, A. P.; MARIOTTO, L. A mixed integer programming model for optimal fault section estimation in power systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Oxford, v. 77, p. 372–384, 2016.

PARK, D. Y.; AHN, B. S.; KIM, S. H. Dealing uncertainties in the fault diagnosis system. *In*: INTELLIGENT SYSTEM APPLICATION TO POWER SYSTEMS ISAP 1999, Rio de Janeiro. **Proceedings** [of the...] Rio de Janeiro, 1999.

PENG, Y.; REGGIA, J. A. Plausibility of diagnostic hypotheses: the nature of simplicity. *In*: NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 1986, philadelphia. **Proceedings** [of the...]. Philadelphia: Association for the Advancement of Artificial Intelligence- AAI, 1986.

PENG, Y.; REGGIA, J. A. **Abductive inference models for diagnostic problem-solving**. New York: Springer, 1990. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-8682-5>. Acesso em: 12 ago. 2018.

POPLE, H. E. On the mechanization of abductive logic. *In*: PROCEEDINGS OF THE 3RD INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE 1973, San Francisco. **Proceedings** [of the...]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1973. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1624775.1624793>. Acesso em: 12 maio 2019.

PROTOPAPAS, C. A.; PSALTIRAS, K. P.; MACHIAS, A. V. An expert system for substation fault diagnosis and alarm processing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Pisacatawy, v. 6, n. 2, p. 648–655, 1991.

REGGIA, J. A.; NAU, D. S.; WANG, P. Y.; PENG, Y. A formal model of diagnostic inference, II. Algorithmic solution and application. **Information Sciences**, , v. 37, n. 1–3, p. 257–285, 1985.

RODRIGUEZ, C.; RERNENTERÍA, S.; MARTÍN, J. I.; LAFUENTE, A.; MUGUERZA, J.; PÉREZ, J. Fault analysis with modular neural networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 18, n. 2, p. 99–110, 1996.

SOUZA, J. C. S.; RODRIGUES, M. A. P.; SCHILLING, M. T.; DO COUTTO FILHO, M. B. Fault location in electrical power systems using intelligent systems techniques. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 16, n. 1, p. 59–67, 2001.

STACCHINI DE SOUZA, J. C.; MEZA, E. M.; SCHILLING, M. T.; FILHO, M. B. D. C. Alarm processing in electrical power systems through a neuro-fuzzy approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 537–544, 2004.

STEMMER, F. A.; BASTOS, A. C. A. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Porto Alegre: CEEE, 1977. Vol. 2.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; YIN, K.; KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis. **Computers & Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 293–311, 2003.

VIELMA, J. P. Mixed integer linear programming formulation techniques. **SIAM Review**, Philadelphia, v. 57, n. 1, p. 3–57, 2015.

WEN-HUI CHEN; CHIH-WEN LIU; MEN-SHEN TSAI. On-line fault diagnosis of distribution substations using hybrid cause-effect network and fuzzy rule-based method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 15, n. 2, p. 710–717, 2000.

WEN-HUI CHEN; CHIH-WEN LIU; MEN-SHEN TSAI. Fast fault section estimation in distribution substations using matrix-based cause-effect networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 16, n. 4, p. 522–527, 2001.

WEN, F.; CHANG, C. S. A tabu search approach to fault section estimation in power systems. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 63–73, 1997.

WEN, F.; CHANG, C. S. A new approach to fault diagnosis in electrical distribution networks using a genetic algorithm. **Artificial Intelligence in Engineering**, Amsterdam, v. 12, n. 1–2, p. 69–80, 1998.

WEN, F.; HAN, Z. Fault section estimation in power systems using a genetic algorithm. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 34, n. 3, p. 165–172, 1995.

XU LUO; KEZUNOVIC, M. Implementing fuzzy reasoning petri-nets for fault section estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 2, p. 676–685, 2008.

YANN-CHANG HUANG; CHAO-MING HUANG; CHIUNG-CHOU LIAO; JEN-FU CHEN; HONG-TZER YANG. A new intelligent fast petri-net model for fault section estimation of distribution systems. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY. PROCEEDINGS (CAT. NO.00EX409) 2000, Perth.

Proceedings [of the...]. Perth: IEEE, 2000. Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/900059/>. Acesso em: 20 jun. 2018.