UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

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

TESE DE DOUTORADO

Paulo Cícero Fritzen

Santa Maria, RS, Brasil

2012

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

por

Paulo Cícero Fritzen

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, **Área de Concentração em Processamento de Energia**, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,

aprova a Tese de Doutorado

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

elaborada por

Paulo Cícero Fritzen

como requisito parcial para obtenção do grau de

Doutor em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

_____

Jacqueline Gisèle Rolim, Dra. Eng. (UFSC)

_____

João Paulo Abreu Vieira, Dr. Eng. (UFPA)

_____

Lenois Mariotto, Dr. Eng. (UFSM)

_____

Adriano Peres de Morais, Dr. Eng. (UFSM)

Santa Maria, 21 de Setembro de 2012.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática
da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fritzen, Paulo Cícero
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 / Paulo Cícero Fritzen.-2012.
130 p.; 30cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012

1. Processamento de alarmes 2. Estimação da seção em falta 3. Heurística Construtiva 4. Programação inteira 5. Inteligência computacional I. Cardoso Junior, Ghendy II. Título.

 Endereço: DAELT Bloco D 1º andar, Av. Sete de Setembro, 31655, Bairro Rebouças, Curitiba, PR, 80230-901.

Fone (0xx) 41 3310 4626; End. Eletr.: pcfritzen@utfpr.edu.br

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar em todas as minhas realizações. A todos os meus familiares e amigos, que mesmo sem muita convivência nestes últimos anos, tenho certeza que torciam por mim. A toda família de minha esposa por todo incentivo, visto os diferentes sentidos que essa palavra possa ter.

Ao Professor Ghendy Cardoso Junior pelos conhecimentos transmitidos e seriedade que brindou durante a orientação deste trabalho, bem como a gratidão da sua amizade.

Ao Professor Olinto César Bassi de Araújo pelas sugestões e colaboração em vários momentos deste trabalho.

Aos colegas João Zauk e Aécio Oliveira pelas contribuições e valiosas sugestões.

Aos professores, colaboradores e colegas do CEEMA pela agradável convivência durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores, membros da Comissão Examinadora, pelas valiosas sugestões.

À CAPES, pelo suporte financeiro e à Universidade Federal de Santa Maria por ter me proporcionado um ensino de qualidade e gratuito. Agradeço também aos colegas da Área Indústria do IFTO, Campus Palmas e à UTFPR, em especial ao DAELT, pelo apoio nos momentos finais da tese.

"Quando Deus está conosco, quando colocamos toda nossa confiança nEle, nada é impossível". (Marcelino Champagnat)

DEDICATÓRIA

Além de realizar um agradecimento especial, e uma menção carinhosa, quero dedicar este trabalho aos meus filhos, Arthur e Alex Rafael e à minha esposa e eterna namorada Tatiana Grasser, pelo incentivo incansável, dedicação, compreensão, apoio, e permanente carinho, fundamentais em minha vida. Amor, eu sei que minhas palavras de agradecimento jamais farão justiça aos seus esforços e sacrifícios, entretanto sei também que só aqueles que amam de verdade são capazes de tais privações.

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

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

AUTOR: PAULO CÍCERO FRITZEN

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 21 de Setembro de 2012.

Este trabalho propõe uma metodologia capaz de realizar o processamento de alarmes e estimar a seção em falta em sistemas elétricos de potência. A finalidade é filtrar os alarmes gerados durante um desligamento e indicar qual equipamento está sob falta. Para resolver o problema, são utilizados os métodos da Heurística Construtiva (HC) e da Programação Inteira (PI), através de sua integração. Inicialmente, o método da HC realiza, através dos alarmes sinalizados por relés de proteção e estado de disjuntores, uma análise quanto à direção da falta em cada equipamento do sistema de energia elétrica. Assim, a HC na posse de tantas informações quanto possível realiza uma análise em nível de equipamento (barramentos, transformadores de potência e linhas de transmissão), podendo ou não identificar a direção em que o distúrbio ocorreu. O processamento final é feito pela PI, que analisa a resposta do sistema de proteção como um todo (análise em nível de sistema), usando a topologia pós-falta da rede juntamente com a resposta da HC, indicando a(s) seção(ões) em falta(s) e as possíveis falhas de abertura em disjuntores.

Palavras-chave: Processamento de alarmes; Estimação da seção em falta; Heurística Construtiva; Programação inteira; Inteligência computacional; Sistemas elétricos de potência.

ABSTRACT

Doctoral Thesis

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

FAULT SECTION ESTIMATION AND ALARM PROCESSING IN POWER SYSTEMS USING A HYBRID SYSTEM BASED ON CONSTRUCTIVE HEURISTIC AND INTEGER PROGRAMMING

AUTHOR: PAULO CÍCERO FRITZEN

ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

Santa Maria, September 21, 2012.

This work proposes a methodology which is able to accomplish alarms processing and to estimate fault section in electrical power systems. The purpose is to filter alarms generated during a shutdown and indicate which equipment is at fault. To solve this problem, the methods employed are Constructive Heuristic (CH) and Integer Programming (IP) through their integration. Initially, CH method performs an analysis of fault direction in each power system equipment through alarms signaled by protective relays and circuit breakers status. Thus, by having as much information as possible, CH carries out an analysis on the level of equipment (busbars, power transformers and transmission lines) which can or cannot identify the direction in which disturbance occurred. The final processing is performed by IP, which analyzes the response of protection system as a whole (system-level analysis), using post-fault topology of power grid along with response of CH, indicating the fault section (s) and possible failures in the opening of circuit breakers.

Keywords: Alarm processing; Fault section estimate; Constructive heuristic; Integer programming; Computational intelligence; Electrical power systems.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE APÊNDICES

SUMÁRIO

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações relativas ao processamento de alarmes e estimação da seção em falta. Também são ressaltadas as contribuições do trabalho, além de uma breve revisão da bibliografia, mostrando a evolução dos métodos utilizados na tentativa de solucionar o problema.

De acordo com CARDOSO Jr *et al.* (2001), em sistemas elétricos de potência um grande número de mensagens e alarmes é transmitido aos centros de controle após a ocorrência de distúrbios. Tais distúrbios são provocados por diferentes tipos de faltas, podendo ocorrer em qualquer parte do sistema (2001).

Uma falha no sistema principal de alimentação de energia pode desencadear centenas e às vezes milhares de alarmes e eventos. Algumas estimativas sobre o número máximo de alarmes que pode ser desencadeado por vários tipos de eventos foram estabelecidas para os centros regionais de controle da Hydro Quebec (KEZUNOVIC & GUAN, 2009):

- Acima de 150 alarmes para uma falta no transformador;

- Acima de 2000 alarmes para uma falta na subestação de geração, os primeiros 300 alarmes são gerados durante os primeiros cinco segundos;

- Acima de 20 alarmes por segundo durante uma tempestade de raios e trovões;

- Acima de 15000 alarmes para cada centro regional durante os primeiros cinco segundos de um sistema em completo colapso.

Os equipamentos de proteção são responsáveis por detectar a ocorrência de uma falta e isolar somente a parte defeituosa do sistema (seletividade). Segundo COUTTO FILHO *et al.* (1999), é essencial que o restabelecimento do sistema ocorra o mais rapidamente possível, de modo a evitar danos aos consumidores, denegrindo a imagem da empresa fornecedora. Logo, a estimação dos eventos que produzem uma determinada sequência de alarmes deve proceder de forma rápida e precisa.

Os operadores do sistema podem ser surpreendidos por um devastador número de alarmes reportados em virtude da ocorrência de contingências. Se esses alarmes não forem

filtrados ou processados de acordo com a sua importância e agrupados dentro de uma janela de tempo capaz de definir um determinado evento, eles por si só podem confundir a equipe responsável pelo controle e monitoramento da operação (FRITZEN *et al.*, 2009).

Com base nessas informações, os operadores devem usar sua experiência para decidir o que exatamente aconteceu com o sistema. Esta tarefa pode ser difícil, porque existe a possibilidade de vários eventos, falhas ou funcionamento indevido dos relés, falha nos disjuntores e falha nas unidades remotas de aquisição de dados.

Nos últimos anos, com as mudanças ocorridas na legislação vigente, e com as exigências dos órgãos reguladores e fiscalizadores do setor energético, as empresas do setor elétrico estão obrigadas a assegurar aos seus clientes bons níveis de continuidade e confiabilidade no fornecimento da energia elétrica. Para alcançar estes objetivos**,** além de investir na otimização dos seus sistemas de transmissão e distribuição**,** as empresas responsáveis pelo fornecimento da energia elétrica têm investido na digitalização de suas subestações**,** implantando sistemas de gerenciamento de dados, como por exemplo, do tipo SCADA, Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data-Acquisition*).

Segundo LEÃO *et al.* (2009), os modernos centros controle de distribuição apresentam capacidade de monitoramento e controle em tempo real de várias subestações. Isto é possível pela implantação de sistemas integrados, onde dispositivos eletrônicos inteligentes (IED, i*ntelligent electronic devices*), como por exemplo, relés digitais, são instalados em subestações para controlar as condições de funcionamento do sistema. Todos os alarmes e eventos produzidos nas subestações são transmitidos para o sistema SCADA, que são interligados por uma rede WAN (*Wide Area Network*) para finalmente chegar ao sistema SCADA centralizado.

Estes sistemas possuem uma alta capacidade e flexibilidade na transmissão de grandes fluxos de informações provenientes do enorme número de dispositivos de proteção e controle alocados nos grandes sistemas de energia elétrica (HOR e CROSSLEY, 2005), porém não possuem a habilidade de interpretar essas informações e tomar decisões em nível operacional.

Na operação em tempo real, antes de iniciar a etapa de restauração, os despachantes necessitam estimar a causa dos desligamentos a partir de um conjunto muito grande de informações.

Com o advento dos recursos de informática, os serviços relacionados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica passaram a depender de computadores e redes

de telecomunicações para o monitoramento e controle. Um pequeno grupo de operadores em um centro de operação é responsável pela supervisão de uma área que compreende dezenas de subestações, englobando vários milhares de pontos (NEIS, 2006).

A automatização da análise da operação de disjuntores e relés tem sido motivo de pesquisa desde 1969 (DYLIACCO & KRAYNAK, 1969), e a utilização de técnicas de Inteligência Artificial (IA) a este tipo de problema teve início no final dos anos 70 (SAKAGUCHI & MATSUMOTO, 1983).

O uso de ferramentas computacionais de apoio à tomada de decisão se tornou essencial nos centros de operação e controle dos sistemas de energia elétrica, especialmente para restaurar o sistema ao seu estado normal funcionamento.

Sistemas especialistas, redes neurais, algoritmos genéticos, grafos estruturados e lógica *fuzzy*, são as técnicas sugeridas ao processamento de alarmes e estimativa de seção em falta. Nesta tese algumas destas técnicas são avaliadas bem como outras, para fornecer subsídios na escolha da mais adequada para solução do problema proposto.

O uso de ferramentas computacionais de apoio à tomada de decisão se tornou essencial nos centros de operação e controle dos sistemas de energia elétrica, especialmente para restaurar o sistema ao seu estado normal funcionamento.

Sistemas especialistas, redes neurais, algoritmos genéticos, grafos estruturados e lógica *fuzzy*, são as técnicas sugeridas ao processamento de alarmes e estimativa de seção em falta. Nesta tese, algumas destas técnicas como a rede neural GRNN e os algoritmos genéticos são avaliadas mais detalhadamente, no entanto foram substituídas pelas técnicas da heurística construtiva (HC) e da programação inteira (PI) porque apresentaram excelentes respostas e por serem de fácil utilizaçãoe interação por parte dos usuários.

O processamento de alarmes e a estimação da seção em falta ainda apresentam alguns desafios a serem solucionados. Logo, como objetivo inovador, este trabalho tem a finalidade de propor uma nova ferramenta computacional e metodologia fundamentada nos métodos da Heurística Construtiva e da Programação Inteira, com características de auto-aprendizado que possua a facilidade de se adaptar a novas informações, atualizando o seu banco de dados sem a necessidade de novos treinamentos ou ajustes de parâmetros por parte do pessoal da operação. Deste modo, solucionar ou minimizar os problemas relacionados à lógica de proteção através da avaliação individualizada dos equipamentos pela HC e através da PI, com os resultados prévios da HC, estimar qual seção ou equipamento sofreu uma falta ou apresentou alguma falha ou defeito. Caso ocorra a sinalização de um novo evento não previsto

pela ferramenta computacional ou ainda nunca observado, caberá ao operador avaliar se inclui ou não esta informação ao banco de dados de maneira fácil e rápida.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia para o processamento de alarmes e estimação da seção em falta que possa ser aplicado adicionalmente aos centros de operação e controle de qualquer sistema ou companhia de energia elétrica, utilizando os métodos da Heurística Construtiva (HC) e Programação Inteira (PI).

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Desenvolver uma metodologia para a estimação em falta, capaz de estabelecer a relação entre a causa e o efeito e que forneça suporte aos operadores em tempo real, além de permitir facilmente implementação de novas informações e com facilidade de adaptação a novas informações, não necessitando de novos ajustes em parâmetros por parte do usuário;
- ✓ utilizar a Heurística Construtiva como um meio de se modelar a filosofia de proteção em nível de equipamento (estados de relés e disjuntores);
- ✓ utilizar a Programação Inteira como um meio de se modelar a inter-relação das proteções individuais de cada equipamento, conduzindo a uma resposta em nível de sistema;
- ✓ implementar os métodos da Heurística Construtiva (HC) e Programação Inteira (PI) com características de auto-aprendizado;

1.3 Motivação

As disposições ou condições para o funcionamento normal de um sistema elétrico envolvem uma grande despesa em equipamentos e operação, mas um sistema concebido de acordo com este aspecto não conseguiria atender exigências atuais. Falhas de equipamentos elétricos causariam interrupções intoleráveis. Assim, deve haver ferramentas adicionais para minimizar os danos aos equipamentos e interrupções do serviço quando ocorrem desligamentos não programados na rede elétrica.

Os sistemas de transmissão, constituídos por linhas de transmissão e subestações de alta e extra-alta tensão, são normalmente gerenciados pelos sistemas SCADA e/ou EMS (*Energy Management System*). A monitoração em tempo real desses sistemas viabiliza a implementação de ferramentas computacionais destinadas à operação em tempo real.

Em sistemas elétricos de potência, após a ocorrência de uma falta, o operador necessita selecionar as mensagens mais relevantes, extrair uma conclusão a partir dos dados disponíveis, isolar o(s) equipamento(s) suspeitos, restabelecer os demais equipamentos desligados em virtude da falta, deslocar as equipes de manutenção, e agir apropriadamente de modo a restabelecer o sistema ao seu estado seguro. Cabe ao operador decidir se pode ou não religar os equipamentos atingidos pelo desligamento.

A necessidade e importância de uma ferramenta de processamento de alarmes e estimador da seção em falta para auxilio na operação de sistemas de energia elétrica é reconhecida por todos que atuam no setor, principalmente em condições de emergência. Apesar disto, poucas destas ferramentas se encontram implementadas na maioria das subestações do Brasil e do mundo. Pode-se citar o SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia) desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) da estatal brasileira Eletrobras, através dos módulos SAGE/SCADA (Supervisão e Controle de Redes Elétricas), SAGE/EMS (Análise de Redes em Tempo Real e de Estudos) e SAGE/SIA (Subsistema de Inteligência Artificial). Além destes, o sistema PEDA (*Protection Engineering Diagnostic Agents*) que desde 2004 mostraram-se eficientes em gerenciar e interpretar inteligentemente os dados *on-line* da operação do sistema elétrico do Reino Unido. A razão de se ter poucas ferramentas reside na dificuldade de equacionamento de todas as etapas envolvidas no processo de tomada de decisão o que também torna difícil uma solução em tempo real.

Deste modo, devido à inexistência de ferramentas computacionais consolidadas no Brasil para o auxílio a operação em tempo real quando da ocorrência de desligamentos não programados, deseja-se disponibilizar uma ferramenta computacional de auxílio à tomada de decisão, que, juntamente com o sistema de supervisão, poderá tornar mais rápida esta tarefa e diminuir os riscos causados por uma má interpretação dos eventos sinalizados capaz de lidar com incertezas, principalmente nos casos de sobrecarga de informações.

1.4 O estado-da-arte

O processador de alarmes deverá ser capaz de operar "em tempo real". A definição de "tempo real", neste caso, significa que o sistema garante a obtenção do resultado dentro de um intervalo de tempo fixo de atualização do sistema SCADA. O efeito prático desta imposição é que o operador poderá obter um diagnóstico da situação em tempo hábil, mesmo para casos complexos (NEIS *et al*., 2005).

O trabalho de URAIKUL *et. al.* (2007) apresentou os resultados obtidos por quatro grupos de pesquisa, que realizaram um trabalho extenso na integração da detecção de faltas e abordagens de diagnóstico na elaboração de sistemas inteligentes para a utilização no controle, monitoramento e diagnóstico, que incorporam ou não as tecnologias de inteligência artificial (IA).

Em HOSSACK *et al.* (2003) foi apresentado um novo sistema multi-agente (SMA) ao qual denominou de PEDA (*Protection Engineering Diagnostic Agents*) ou agentes de diagnóstico para a engenharia de proteção, que integra as informações herdadas do sistema de interpretação SCADA com a interpretação dos novos sistemas de registradores digitais de falha e melhorar a recuperação de falhas de gravação de registradores digitais remotos. O uso da tecnologia do sistema multiagente fornece uma arquitetura flexível e escalável e aberta para a introdução de sistemas de interpretação de dados novos.

Os autores DAVIDSON *et al.* (2006) discutem sobre a robustez para uso *on-line* do sistema PEDA que usa a tecnologia do SMA para integrar a análise de um número de dados herdados e sistemas de recuperação, a fim de agrupar automaticamente e analisar os dados de potência do sistema relativos à operação de proteção. Estas ferramentas de análise de dados incluem o sistema especialista baseado em regras que interpreta os dados SCADA, um sistema especialista baseado em regras que classifica e interpreta os dados do DFR (*digital*

fault recorder), e um sistema com modelagem baseada no raciocínio MBR (*model-based reasoning*) que valida a operação da proteção. Os autores destacam ainda que, os agentes PEDA apoiam engenheiros de proteção, pois fornecem acesso aos dados interpretados dos sistemas de energia em minutos através da rede intranet corporativa.

A grande maioria dos trabalhos publicados utilizam redes neurais artificiais (RNA) (CARDOSO Jr *et al.,* 2004; NEGNEVITSKY & PAVLOVSKY, 2005) e lógica difusa (SOUZA *et al*., 2004 e MIN *et al*., 2004) para localizar e identificar faltas nos sistemas elétricos utilizando as informações dos dispositivos de proteção e controle. A maior desvantagem das RNA é o grande esforço computacional que se emprega em seu treinamento, especialmente em sistemas de grande porte, mesmo que seja *off-line*, como em NEGNEVITSKY & PAVLOVSKY (2005), onde se construiu uma rede neural artificial para cada seção do sistema elétrico. Assim, caso ocorra uma falta que não esteja prevista pelo treinamento da rede, seria necessário realizar novos ajustes nos parâmetros das redes neurais com a inclusão destas novas informações, o que pode inviabilizar a implementação do programa para a localização de faltas *on-line*.

O artigo apresentado por MACHADO *et. al,* (2009) realiza uma análise comparativa entre diversas arquiteturas de redes neurais de modo a identificar a mais adequada ao processamento de alarmes. As redes analisadas foram: BP (*Backpropagation*), RBF (*Radial Basis Function*), PNN (*Probabilistic Neural Network*), GRNN (*Generalized Regression Neural Network*), SOM (*Self-Organizing Maps*), Kohonen e Elman. Os resultados obtidos indicam que a rede mais apropriada para ser utilizada em um processador inteligente de alarmes é a GRNN, pois obteve desempenho máximo para todos os casos testados, além de apresentar um treinamento bastante simples e rápido.

LIMIN *et al.* (2004) apresentam três modelos de redes Bayesianas para estimar a seção em falta de um sistema de potência, que são utilizados para localizar as faltas nas linhas de transmissão, transformadores e barramentos. O algoritmo de aprendizagem para os parâmetros de rede é análogo ao algoritmo de *backpropagation* das redes neurais. Considera a soma do erro médio quadrático entre os valores esperados e os resultados calculados de variáveis como a minimização função de otimização, que ajusta os parâmetros da rede continuamente.

Desde finais dos anos oitenta, os conceitos de processamento de alarmes que filtram ou suprimem alarmes têm sido utilizados na prática em muitos sistemas. Assim, muitas

técnicas inteligentes foram utilizadas. O artigo de KEZUNOVIC & GUAN (2009) apresentou algumas conclusões sobre as principais técnicas inteligentes, como mostrado a seguir:

A técnica de Sistemas de Especialistas (SE) é bem adequada para o problema em questão porque reproduz o comportamento de especialistas que realizam comparações entre o fato e a regra. A desvantagem é que um sistema especialista tem de ser desenvolvido usando um conhecimento formalizado que capta corretamente a expertise (pericia, habilidade), o que não é nada trivial.

A técnica da Lógica *Fuzzy* (*Fuzzy Logic* ou FL) proporciona um meio conveniente para inexatidão de modelagem e incertezas, portanto é uma solução poderosa para ser aplicada, pois lida com 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 propriedades das variáveis *fuzzy*.

A rede de Petri (*Petri-nets* ou PN) possui características adequadas para a representação gráfica de um evento discreto e processamento de informações em paralelo. Apesar de muito rápido, a natureza dinâmica da mudança temporal dos alarmes não pode ser facilmente capturada com a abordagem das redes Petri típica, a menos de ajustes sejam feitos.

A técnica de raciocínio difuso das redes Petri (*Fuzzy Reasoning Petri-nets* ou FRPN) aproveita as vantagens do Sistema Especialista e da Lógica Difusa, bem como o processamento paralelo das informações. Algumas desvantagens anteriormente mencionadas das técnicas individuais podem ser compensadas pelos benefícios provenientes da combinação das técnicas. Uma desvantagem implícita do tradicional sistema com base no conhecimento é que eles podem ser incapazes de manusear cenários complexos que não foram considerados na fase de aquisição de conhecimento, implementação ou validação. Soluções baseadas em eventos discretos mostram que as redes de Petri também têm várias limitações. Por exemplo, o número de entradas iniciais é limitado e é difícil para modelos inexatos e incertos. Consequentemente, para identificar com precisão a seção em falta sob circunstâncias complexas, informações substanciais e regras heurísticas são adicionalmente necessárias.

O artigo de SHUI *et. al*. (2009) apresentou uma revisão sobre as principais realizações na pesquisa de diagnóstico de faltas em sistemas de controle, a partir de três aspectos que incluem a detecção, isolamento de faltas e diagnóstico de faltas de sistemas híbridos inteligentes. Destacou que o diagnóstico de faltas híbrido inteligente está em evidência nos atuais campos de pesquisa, e são dignos de uma pesquisa mais profunda. Este artigo destaca ainda que os sistemas híbridos inteligentes apontam para uma importante direção futura de

pesquisa e desenvolvimento em diagnósticos de sistemas. As desvantagens do método de diagnóstico com base em sistemas únicos são graves o suficiente para limitar as suas aplicações a pequenos estudos de caso e as tornam impróprias para sistemas de controle de larga escala. Isto faz com que a aplicação de modernas técnicas de inteligência artificial seja importante.

SOUZA *et. al.* (2004) apresenta uma metodologia para processamento de alarmes e diagnóstico de falta que combina o uso de RNA com a lógica *fuzzy*. As entradas para a RNA são padrões alarmes enquanto as relações *fuzzy* são estabelecidas de modo a formar uma base de dados utilizados para treinar as RNA. Cada neurônio da rede neural artificial é responsável por estimar o grau de adesão de um componente específico do sistema para classificar o componente sob falta. Por outro lado, LIN; LIN; SUN (2004) apresentam um método para o processamento de alarmes que utiliza a rede probabilística (*Probabilistic Neural Network*).

FRITZEN *et. al.* (2010a) apresenta uma metodologia híbrida entre as Redes Neurais Artificiais (RNA) e os Algoritmos Genéticos (AG) para resolver o problema processamento de alarmes e diagnóstico de falta. A rede neural artificial (RNA) processa os alarmes de acordo com a lógica de operação dos relés de proteção associados a cada equipamento reduzindo as mensagens associadas aos relés de proteção. O algoritmo genético (AG) alimentado com a lógica que relaciona os relés aos disjuntores bem como pelas informações obtidas da RNA e após processar estas informações fornece respostas ao problema.

No trabalho apresentado por LEÃO *et al,* (2006) é proposto um modelo de programação binária irrestrito (PB) para diagnósticos de faltas em sistemas de energia elétrica. A solução do modelo de PB irrestrito é obtida através de um algoritmo genético (AG) dedicado e seus parâmetros de controle são calibrados para obter eficiência computacional e precisão dos resultados.

O trabalho de WU *et al*. (2007) apresenta uma nova estrutura para processamento de alarmes. É proposto um processador de alarmes que pode ser executado a nível tanto no Sistema de Automação da Subestação (SAS) quanto do sistema de gestão de energia (*Energy Management System* - EMS). O processador de alarmes em nível da SAS é capaz de obter uma análise mais precisa dos eventos da subestação como um todo, pois utiliza dados extras de medição da subestação que não estão disponíveis no EMS. O EMS correlaciona eventos de diversas subestações para gerar cenários globais do sistema.

O trabalho apresentado por SONG & KESUNOVIC (2007) visa à detecção precoce e prevenção da cascata de eventos usando o método de análise de estado estável em seu estágio

inicial. A novidade deste método é que ele pode ser implementado para funcionar automaticamente, com ou sem a supervisão de operador, e pode servir como uma ferramenta de suporte à decisão para a operação de tempo real objetivando a formação dos operadores.

XIAO & WEN (2007) propõem em seu artigo um modelo para diagnóstico de faltas em sistemas de potência utilizando a combinação entre as teorias da *Fuzzy set-covering* e *Parsimonious set-covering*. Com base nas informações recebidas, o modelo procura identificar o modo de operação mais adequado, e fornece informações correspondentes para que a hipótese da falta possa ser obtida.

KEZUNOVIC & GUAN (2009), em seu trabalho, apresentam duas novas opções de processadores de alarmes inteligentes. Um deles é modelo de diagnóstico baseado no raciocínio f*uzzy* e redes Petri, e o outro é um avançado processador de alarme que combina técnicas de processamento, tanto a nível do SAS quanto a nível do EMS.

Em CHEN (2011) foi apresentada uma técnica de raciocínio *fuzzy* através de regras para a matriz de transformações para estimar as seções em falta das subestações de distribuição. Este estudo estendeu sua aplicação para o diagnóstico de falta através do raciocínio binário da lógica *fuzzy*. Nos procedimentos de inferência, as causalidades das seções em falta e as ações dos dispositivos de proteção foram representados pela primeira vez através das redes de causa-efeito *fuzzy* (*fuzzy cause-effect networks* ou FCE-Nets). Após realizar algumas operações simples de matriz, as seções com possíveis faltas são estimadas. Esta abordagem proposta ofereceu um panorama claro, raciocínio rápido, capacidade de lidar com a incerteza, e não tem nenhum problema de convergência durante o procedimento de diagnóstico.

O trabalho apresentado por FRITZEN *et al*., (2010b) aborda aspectos relativos ao problema de processamento de alarmes e diagnóstico de faltas visando uma metodologia que permita uma complementação entre as Redes Neurais Artificiais (RNA) e um modelo matemático de programação binária baseado em recobrimento (PBR).

O trabalho de MILANOVIĆ & AVENDAÑO-MORA (2012) apresenta uma formulação para o problema de localização de falta que pode ser implementado em grandes sistemas de potência. A formulação proposta modela o posicionamento para o monitoramento como um problema de programação linear inteira, de modo a localizar corretamente qualquer falta que possa vir a ocorrer em qualquer ponto da rede.

Nos últimos anos a evolução dos modelos determinísticos tem possibilitado sua utilização em problemas considerados teoricamente NP-difícil (*Nondeterministic Polynomial-*

hard), e, devido às características do problema de processamento de alarmes, o tempo de resolução do modelo matemático não é impeditivo. O NP-difícil (ou NP-hard) na teoria da complexidade computacional é uma classe de problemas que são pelo menos tão difíceis quanto os problemas mais difíceis em NP. Os problemas NP-difíceis podem ser de qualquer tipo: problemas de decisão, problemas de pesquisa ou problemas de otimização.

1.5 Contribuições da Tese

Algumas das principais contribuições da Tese são aqui citadas:

- Desenvolvimento de uma nova metodologia para a estimação da seção em falta;
- Heurística Construtiva: utilizada como um meio de se modelar a filosofia de proteção em nível de equipamento (estados de relés e disjuntores);
- Programação Inteira: utilizada como um meio de se modelar a inter-relação das proteções individuais de cada equipamento, conduzindo a uma resposta em nível de sistema;
- Ambas as técnicas permitem a atualização de novas informações no banco de dados sem necessitar novos ajustes e parâmetros;
- Possibilita o usuário interagir com a ferramenta computacional de modo que as informações que julgarem pertinentes possam ser cadastradas na base de dados;

1.6 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 é apresenta uma visão geral sobre os dispositivos de proteção, dos sinais e informações enviados por estes dispositivos aos centros de operação e controle, indicando quais equipamentos apresentam defeitos. Estas informações de alarmes e eventos são essenciais ao processamento de alarmes e estimativa de seção em faltas, e suas definições e principais características são apresentadas.

O Capítulo 3 aborda alguns fundamentos das técnicas estudadas para a solução do problema de processamento de alarmes e estimativa de seção em faltas em sistemas de potência. Assim, são apresentados fundamentos das Redes Neurais Artificiais (RNA) do tipo GRNN, dos Algoritmos Genéticos (AG), da Heurística Construtiva (HC), da Programação

Inteira (PI), da Aproximação de Bayes e por último são apresentadas breves descrições sobre as associações entre algumas das técnicas acima citadas, conhecidas como técnicas Híbridas.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia do trabalho, que consiste na demonstração do método utilizado para a resolução do problema por esta tese. Além de mostrar a solução proposta para o problema de estimativa de seção em falta, através da modelagem da Heurística Construtiva para os equipamentos (transformador, barras e linhas de transmissão) e formulação matemática da Programação Inteira que recebe as informações da HC e dos disjuntores do sistema (topologia da rede desligada). Também são destacadas algumas considerações finais neste capítulo.

No Capítulo 5, é definido o sistema elétrico potência teste utilizado para implementação do processador de alarmes estimador de seção em falta. Também são exibidos alguns casos teste, bem como as discussões sobre resultados obtidos durante os estudos realizados.

Para finalizar, no Capítulo 6, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros da tese são abordadas.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Considerações gerais

No dia 10 de novembro de 2009, o Brasil ficou no escuro pela quarta vez em dez anos. Em 1999, o problema foi uma sobrecarga que derrubou o sistema. Em 2001 e 2002, o racionamento de energia foi imposto, pois havia mais demanda do que oferta e os reservatórios das hidroelétricas estavam abaixo do nível. Em 2007, a queda de duas linhas de transmissão da central elétrica de Furnas causou o problema. Diferente de 2007, quando somente Rio de Janeiro e Espírito Santo ficaram no escuro, o blecaute de novembro de 2009, atingiu 18 estados, segundo o relatório de segurança operacional do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Com três curtos-circuitos monofásicos praticamente simultâneos, vistos pelo SIN como um curto trifásico, o evento produziu a interrupção de 40% da carga total do SIN (Sistema Interligado Nacional) e aconteceu por causa de raios, ventos e chuvas que ocorreram na cidade de Itaberá, estado de São Paulo, que teria provocado um curto circuito nas linhas de transmissão que vem da Usina Hidrelétrica de Itaipu. (ONS, 2009). Em 10 de fevereiro de 2010, um novo blecaute, parcial, atingiu todos os estados da Região Nordeste do Brasil.

Muitos dos eventos que acarretam interrupção do fornecimento de energia elétrica ocorrem devido a causas naturais e transitórias, cabe aos operadores das centrais de operação e controle restabelecer o fornecimento de maneira mais rápida e segura possível. As dificuldades que os operadores encontram para realizar esta tarefa são relacionadas ao grande volume de mensagens reportadas, a necessidade de uma resposta rápida, a interpretação dos alarmes redundantes e eventos múltiplos, a falta de informação de UTRs (Unidades Terminais Remotas), e a falha ou operação indevida de unidades de proteção. Assim, é imprecindível a utilização de uma ferramenta computacional para o processamento de alarmes e estimação da seção em falta capaz de agrupar, selecionar e apresentar somente os alarmes importantes, além de sugerir ações de controle corretivas quando necessário, servindo como apoio à tomada de decisão dos operadores.

Para o perfeito funcionamento dos sistemas elétricos de potência é necessária a utilização de dispositivos que realizem a proteção dos equipamentos durante uma contingência, garantindo a integridade e permitindo seu reestabelecimento em condições normais de operação.

Os esquemas de proteção são elaborados de modo a isolar uma determinada falta o mais rápido possível, por meio do desligamento da menor quantidade de equipamentos. Durante uma falta os alarmes são disparados de modo a sinalizar a operação dos relés de proteção, enviando os códigos com as informações para os centros de operação e controle. Os operadores destes centros podem ser surpreendidos por um elevado número de alarmes reportados em virtude da ocorrência de contingências em um grande sistema elétrico. Estes sinais além de numerosos ainda podem ser ruidosos, ou seja, apresentarem problemas de disparo indevido ou de falha de atuação. Na tarefa de restabelecer o sistema o operador deve no menor tempo possível lidar com tais problemas e apontar o equipamento sob falta afim de não realimentá-lo, e assim poder restaurar o fornecimento de energia ao restante do sistema.

Neste capítulo serão definidos os eventos múltiplos, alarmes falsos e falhos. Ainda será apresentada a forma como a proteção do sistema elétrico foi considerada, ou seja, a filosofia de proteção utilizada no trabalho.

2.2 Proteção de sistemas elétricos de potência

Os equipamentos dos sistemas elétricos de potência (transformadores, linhas e barras) são protegidos por relés e disjuntores. A função destes dispositivos de proteção é atuar durante uma contingência de modo a isolar os equipamentos sob falta o mais rápido possível e assim reduzir a área afetada pelo distúrbio.

Um sistema de proteção (SP) é composto por: relé, transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP), disjuntores e banco de baterias, conforme é mostrado na Figura 2.1.

Os relés de proteção são dispositivos que monitoram constantemente grandezas elétricas em uma rede de energia elétrica, sendo estes responsáveis por acionar, quando necessário, a abertura dos disjuntores.

Os disjuntores são dispositivos mecânicos de abertura e fechamento de contatos comandado pelo relé, destinado a interrupção e restabelecimento das correntes elétricas num circuito.

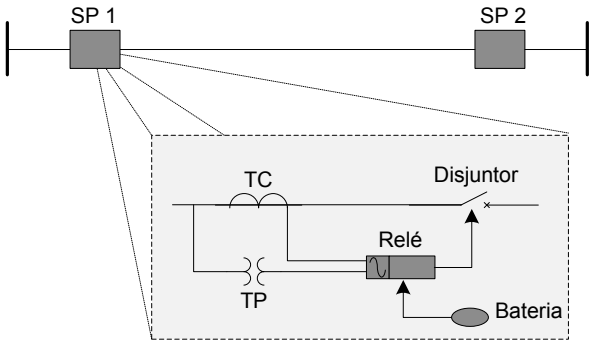


Figura 2.1 - Subsistema de um sistema de proteção

A operação de relés de proteção e disjuntores espalhados pelo 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).

Vários esquemas de proteção são concebidos e utilizados nos sistemas de potência. Os sistemas de proteção são constituídos por conjuntos de relés e dispositivos de interrupção, equipamentos de teleproteção, circuitos de corrente alternada e corrente contínua, circuitos de comando e sinalização, disjuntores, entre outros, etc. A sua finalidade é proteger os componentes da rede (linhas de transmissão, barramentos e equipamentos) ou partes do sistema elétrico de potência quando em condições anormais, indesejáveis ou intoleráveis.

Os alarmes são os registros das anomalias detectadas local ou remotamente. Todos os alarmes disparados são listados, indicando a ocorrência de um defeito. Por meio deles, os operadores da sala de controle são alertados. Outros alarmes indicam o estado do sistema de potência, por exemplo, tensões em diversos locais e correntes nos circuitos mais importantes.

Os registros de todos os alarmes disparados pelo sistema caracterizam o evento. Normalmente, são registradas a data, a hora e a descrição do alarme.

Os alarmes podem ser apresentados no painel de controle dos operadores ou visualizados na tela do computador. No modo digital, os alarmes são armazenados em um banco de dados, de modo a se ter um histórico das ocorrências, que podem ser utilizados em análise posterior, conforme mostra a Figura 2.2.

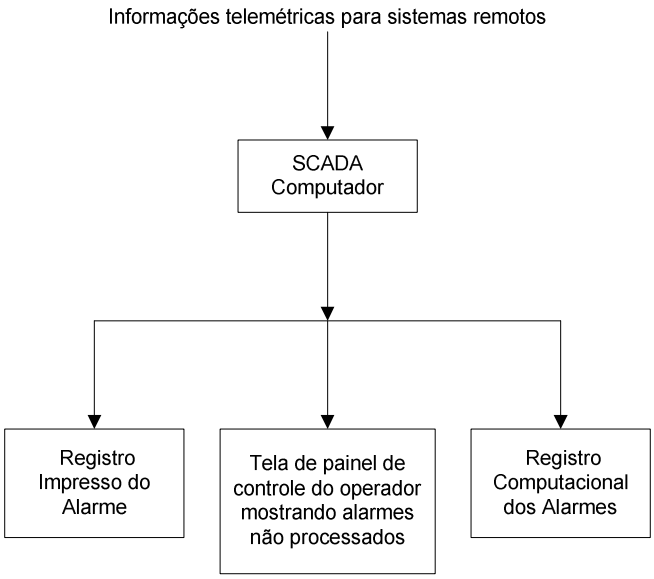


Figura 2.2 - Fluxo dos alarmes (Gers, 2004)

2.3 Caracterizando os alarmes e eventos

Considerando o tamanho e a complexidade de um sistema elétrico de potência típico, um operador humano 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, 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);
- 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, variando de um aplicativo para outro. De uma maneira simplista, pode-se definir alarmes como sintomas apresentados pelo sistema em consequência de eventos ocorridos (CARDOZO; TALUKDAR, 1988; WEN; CHANG;

SRINIVASAN, 1995). Outros autores preferem denominar eventos como “causas” ou “perturbações”, e alarmes como “efeitos”, ou ainda “manifestações” (WEN; CHANG, 1998).

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

2.3.1 Operação Correta

Quando todas as sinalizações dos alarmes atuam corretamente, é definido como operação correta dos alarmes. Desta forma os alarmes recebidos são todos iguais a um dos eventos ou uma combinação dos eventos do conjunto de possíveis eventos do sistema elétrico.

Para um melhor entendimento, é apresentado um exemplo com quatro eventos e cinco alarmes. Os eventos e seus respectivos alarmes são representados pela matriz M, conforme segue e os alarmes recebidos são representados pelo vetor *Ar*.

$$M = \begin{array}{c} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$Ar = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1]$$

É possível analisar que o vetor Ar possui todos os seus elementos iguais aos elementos do 4º evento da matriz M. Desta forma é possível diagnosticar os alarmes recebidos através do evento 4 como atuação correta de todos os dispositivos.

2.3.2 Alarme Falso

Ao serem analisados os conjuntos de possíveis respostas com os alarmes recebidos, nem sempre é possível encontrar uma resposta exatamente igual a um dos possíveis eventos. Quando o conjunto de alarmes recebidos possui elementos que não são justificados pela hipótese dada como resposta, estes são reconhecidos como alarmes falsos. Desta forma, se no exemplo anterior fosse utilizado como resposta e2, teríamos:

$$e_2 = [\mathbf{0} \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1]$$

Os alarmes a4 e a5 são justificados por e2, porém o alarme a1, neste caso, é diagnosticado como falso, pois não é devidamente justificado pelos alarmes do e2.

Este alarme falso pode ser gerado pelo disparo indevido do dispositivo de proteção, por exemplo, devido ao mau ajuste de relés, ou problemas de comunicação entre os dispositivos de proteção e de aquisição de dados.

2.3.3 Alarme Falho

Um ajuste incorreto de um dispositivo de proteção também pode acarretar em problemas de sensibilidade e fazer com que os dispositivos de proteção deixem de atuar de forma adequada. Este problema fica evidente quando no conjunto de alarmes recebidos faltam elementos em relação ao evento com o qual se tenta justificar a falta. Seguindo o meso raciocínio do exemplo anterior, ao analisarmos o evento e3 como resposta aos alarmes recebidos fica evidente a falha de disparo do alarme a2.

$$\mathrm{e_3} = [1 \quad \mathbf{1} \quad 0 \quad 1 \quad 1]$$

Além do problema de ajuste do dispositivo de proteção, uma possível falha de comunicação entre o dispositivo de proteção e o de aquisição de dados, poderia acarretar neste alarme falho.

2.3.4 Eventos Múltiplos

Às vezes mais de uma ocorrência acontece simultaneamente em um sistema elétrico de potência, como por exemplo, um curto-circuito simultâneo em linha de transmissão e transformador de potência ocasionados por descargas atmosféricas. Desta forma os alarmes recebidos são somente justificados por mais de um evento da matriz de possíveis casos. Assim podemos considerar um novo vetor *Ar:*

$$\mathrm{Ar} = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

Se juntarmos os alarmes dos conjuntos de e1 e e2 é possível formar um conjunto exatamente igual ao Ar. Assim os alarmes recebidos teriam sido ocasionados pela ocorrência simultânea de e1 e e2.

$$e_1 = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$
$$e_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1]$$
$$e_1 + e_2 = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

2.4 Atuação da Proteção

Como já mencionado, os esquemas de proteção são projetados de modo a isolar a falta o mais rápido possível, por meio do desligamento da menor quantidade de equipamentos do sistema de potência. Assim, quando há a atuação correta dos relés e disjuntores, a falta é eliminada da forma mais rápida possível e com o menor desligamento possível de equipamentos.

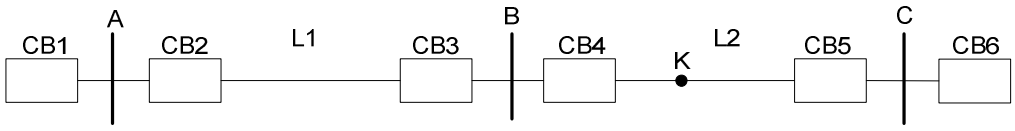


Figura 2.3 – Exemplo proteção principal e retaguarda

Para exemplificar a atuação da proteção principal utilizou-se a Figura 2.3. Considerando uma falta no ponto K indicado na Figura 2.3, os relés da proteção principal da linha L2 são sensibilizados e enviam sinal de disparo para os disjuntores CB4 e CB5. Uma vez recebido o sinal dos relés os disjuntores atuam, desligando a linha L2 e isolando o ponto de falta.

Os relés e disjuntores estão sujeitos a falhas e não raramente sofrem problemas na sua atuação, sejam por falha nos bancos de baterias, problemas mecânicos ou de comunicação entre equipamentos. Assim na falha da proteção principal há a atuação da proteção de retaguarda que atua com um retardo no tempo e possivelmente ocasionando o desligamento de um número maior de equipamentos. A proteção de retaguarda pode ser remota ou local.

A proteção local refere-se à proteção de retaguarda que tenta fazer novamente o desligamento dos mesmos equipamentos acionados pela proteção principal. Assim, ainda no exemplo da Figura 2.3, se houvesse uma falta no ponto K e acontecesse uma falha na abertura

do disjuntor CB4, após um determinado tempo, a proteção de retaguarda local tentaria fazer novamente a abertura do mesmo.

A proteção de retaguarda remota é realizada por um equipamento adjacente ao equipamento sob falta em caso de falhas na proteção principal e na de retaguarda local. Assim no exemplo anterior, novamente na falha da abertura do disjuntor CB4, ou na falha nos relés da L2, após o tempo necessário, a proteção de retaguarda remota da linha L1 deveria abrir o disjuntor CB2 isolando a falta. Como consequências da abertura somente após o disparo da proteção de retaguarda remota da linha L1, outros alimentadores ligados a barra B2 acabariam desligados e equipamentos envolvidos na falta ficariam mais tempo sob estresse devido às correntes de curto circuito terem permanecido por mais tempo no sistema.

2.5 Relés mais utilizados para a proteção de equipamentos de energia

Os relés são utilizados, de forma geral, para a proteção de sistemas de transmissão e distribuição, e isto significa preservar não só as linhas de transmissão e as cargas conectadas a estas, mas também os equipamentos elétricos envolvidos no sistema de potência.

Os transformadores estão sujeitos à faltas a fase, mas muito mais freqüentemente sofrem faltas fase-terra, espira a espira, ou do enrolamento de alta-tensão para o enrolamento de baixa-tensão. Faltas nos transformadores são geralmente de dois tipos: os de ocorrência repentina e os de ocorrência lenta. Deste último são geralmente as faltas incipientes e que, em alguns casos, podem ser detectadas por procedimentos de prevenção, tais como análise do gás do transformador. Faltas de ocorrência repentina terminando em faltas totais devem ser detectadas pelos relés de proteção e gerar um alarme ou mesmo o disparo do disjuntor a ele associado no menor tempo possível para proporcionar o máximo de proteção ao transformador e ao sistema. A proteção de barramento segue as regras gerais de proteção de equipamento, instalando-se geralmente tanto relés para proteção primária como para proteção secundária.

O cuidado com que os relés de proteção de barramento são escolhidos dependerá da importância do barramento para o sistema. Faltas no barramento, em muitas instâncias, põem em perigo a estabilidade, mais do que faltas de linha. Em alguns casos, a eliminação de uma falta no barramento irá dividir o sistema e, inerentemente, evitar a instabilidade. Em outros casos, a eliminação de uma falta no barramento, pode abrir um laço (como também ocorreria

com a eliminação de uma falta de linha), de tal forma que a falta não apenas submeteria os geradores a um choque que possivelmente conduziria à instabilidade, mas a abertura de um laço iria, geralmente, aumentar a impedância de transferência, aumentando a tendência à instabilidade.

Todos os tipos de relés, não importam se dos tipos eletromecânicos, estáticos ou digitais são derivados de duas grandezas: corrente e tensão. Assim, combinando-se convenientemente as parcelas destes, faz-se surgir todos os tipos de relés. Como referência, são citados, a seguir, os relés de utilização mais freqüente. (SANTOS, 2007)

2.5.1 Relés de Corrente

Estes relés têm uma faixa de ajuste que os torna adaptáveis a uma larga faixa de circunstâncias possíveis. Há normalmente dois ajustes: ajustes de corrente e ajustes de tempo. Embora esses ajustes sejam feitos independentemente, a interdependência destes é apresentada nas curvas tempo-corrente, fornecidas no catálogo dos fabricantes.

2.5.2 Relés de Tensão

São aqueles que reagem em função da tensão do circuito elétrico que eles guardam tendo, portanto, um funcionamento muito semelhante aos relés de corrente, exceto pelo fato de que são, mais usualmente, não-temporizados.

2.5.3 Relés de distância

Este é um tipo de proteção que relaciona a corrente no local de instalação do relé, ou seja, no início da linha, com a tensão também no início da linha na fase correspondente. Desta relação entre tensão e corrente resulta a impedância, donde origina o nome deste relé.

Em linhas de transmissão a impedância da linha é proporcional ao comprimento da mesma. Assim, convencionou-se chamar relé de distância àquele que compara as grandezas tensão e corrente no ponto de aplicação da falta.

2.6 Proteção de equipamentos de energia

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

Segundo CAMINHA (1977) existem dois princípios básicos a serem obedecidos, em seqüência 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 ao redor 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 ao 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 arranjados independentemente das possíveis razões de falha da proteção primária, ou seja: corrente ou tensão fornecida ao relé; fonte de corrente fornecida ao disjuntor; circuito de disparo ou mecanismo do disjuntor, relé, etc. (MASON, 1956).

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

2.6.1 Proteção de Transformadores de Potência

A proteção de transformadores é amplamente ditada 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 e fusíveis. Relés de pressão súbita ou diferenciais serão utilizados quando da

necessidade de alta velocidade de atuação ou sensibilidade (IEEE COMMITTEE REPORT, 1981).

Geralmente, os transformadoressão afetados por ocorrência de curtos-circuitos nos enrolamentos, superaquecimento e circuito aberto. A falha de maior incidência é a monofásica, embora possam ocorrer falhas, fase-fase, espira-espira, ou do enrolamento de alta para o de baixa tensão, podendo ser de ocorrência rápida ou lenta (BIONDI NETO & CHINAGER, 1997).

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 & CHINAGER, 1997).

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 e/ou fusíveis. Pequenas unidades com alimentação unilateral, podem contentar-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 & CHINAGER, 1997).

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 temporária. 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 *et al.*, 1999).

2.6.2 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 pólos, baixa pressão SF6 ou óleo, etc.).

2.6.3 Proteção de Linhas de Transmissão

Faltas podem ocorrer em qualquer parte do sistema elétrico, mas as linhas de transmissão, devido à extensa dimensão e à constante exposição à fenômenos atmosféricos e acidentes provocados por atividades humanas, correspondem à parte mais exposta do sistema (BARROS & DRAKE, 1994).

2.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os critérios de avaliação usualmente utilizados nos processadores de alarmes utilizados para a estimação da seção em falta. É amplamente aceito que se deve usar a teoria da parcimônia na análise de múltiplas faltas em sistemas de energia elétrica. A premissa considerada para esta teoria é que o menor número de eventos capaz de explicar os alarmes recebidos deve ser selecionado. Encontrar esses eventos é um problema de otimização, na qual se procura minimizar o número de eventos associados aos alarmes. Neste processo alguns alarmes podem ser considerados falhos, ou seja, deveriam estar ativos para explicar um determinado evento. Ainda existe a possibilidade, mais remota, do alarme ser falso, ou seja, embora ativo não é considerado na solução.

O modo como é considerada a lógica de atuação da proteção nos equipamentos do sistema foi exemplificado através de um exemplo de duas linhas de transmissão, com a atuação da proteção principal, proteção de retaguarda local e retaguarda remota. Também foram avaliadas as consequências da falha na atuação da proteção principal e também da consequente atuação das proteções de retaguarda.

O problema discutido foi caracterizado, demonstrando as dificuldades encontradas na tarefa de criar um algoritmo capaz de realizar a estimação da seção em falta em sistemas elétricos de potência. Um algoritmo utilizado para este fim deve ser capaz de lidar com tais problemas em um tempo hábil para que o operador possa restaurar o sistema, ou ao menos uma parte dele.

Capítulo 3

TÉCNICAS INVESTIGADAS

3.1 Considerações Gerais

Na tentativa de diminuir a possibilidade de erro durante a análise dos alarmes disparados em virtude da operação de relés de proteção, são desenvolvidas ferramentas computacionais destinadas ao processamento de alarmes e localização da seção em falta (CARDOSO, 2003). O principal objetivo dos processadores inteligentes de alarmes é reduzir a quantidade de informações a serem processadas pelos operadores, acelerando o processo de tomada de decisões e reduzindo a probabilidade de erros (KIRSCHEN, D. S. WOLLENBERG, 1992), ajudando o operador a concluir sensatamente e rapidamente sobre os alarmes recebidos, descartando informações redundantes e irrelevantes (GERS, JUAN M.; HOLMES, EDWARD, 2004).

Pode-se destacar ainda, que o processador de alarmes têm como funções melhorar a forma e o conteúdo das mensagens apresentadas ao operador, informar o período de início e fim das condições anormais, apresentar quando possível conclusões cronológicas sobre a falha e, em alguns casos, sugerir ao operador as ações corretivas a serem tomadas.

Sistemas frequentemente descritos na literatura como ”processadores inteligentes de alarmes” utilizam mensagens de alarme para apontar o equipamento sob falta. Embora estes sistemas também busquem uma melhor apresentação das informações para o operador, não possuem o mesmo foco ou objetivo dos verdadeiros processadores de alarmes. Estas ferramentas são mais propriamente designadas por ”sistemas de diagnóstico de faltas” (KIRSCHEN & WOLLENBERG, 1992).

Processadores de alarmes são projetados para tratar todos os possíveis tipos de alarmes. Sistemas de diagnóstico de faltas analisam apenas o conjunto de alarmes necessário para identificar o equipamento em falta. Enquanto o objetivo do processador de alarmes é apresentar um panorama global claro da situação, sistemas de diagnóstico de faltas concentram-se em encontrar uma justificativa plausível para um conjunto de sintomas. Em uma definição ainda mais simples, pode-se dizer que a função de um processador de alarmes é

descrever "o que está acontecendo", enquanto que o papel de um sistema de diagnóstico de faltas é "explicar por que alguns eventos estão ocorrendo" (KIRSCHEN & WOLLENBERG, 1992).

Durante a operação normal, os operadores encarregam-se de ações rotineiras e ajustes para otimizar a segurança e o desempenho do sistema. Tempestades, flutuações de carga ou falhas em equipamentos podem levar o sistema a uma condição insegura ou instável. Em tais situações, o operador da região atingida deve atuar de forma a restabelecer condições aceitáveis de operação. Segundo NEIS *et al.* (2009), as ações envolvidas neste restabelecimento podem ser:

- Diagnóstico da situação/Identificação do problema;
- Localização das possíveis faltas e acionamento de equipes de manutenção;
- Recomposição de subestações ou redes desligadas por dispositivos de proteção.

Equívocos ou omissões ocorridas nestas situações podem levar a uma deterioração do estado do sistema, implicando em desligamento de cargas, danos em equipamentos e possivelmente, no desligamento de uma região ainda maior.

O principal objetivo dos processadores inteligentes de alarmes é reduzir a quantidade de informações a ser processada pelos operadores, acelerando o processo de tomada de decisões, reduzindo a probabilidade de erros por parte dos operadores (KIRSCHEN & WOLLENBERG, 1992). Assim, em resumo, para KIRSCHEN & WOLLENBERG (1992) as três seguintes metas ambiciosas podem ser definidas para um processador inteligente de alarmes:

- reduzir o número de alarmes apresentados ao operador;
- transmitir uma idéia mais clara da situação em que se encontra o sistema de potência após a aparição dos alarmes;
- recomendar medidas corretivas, se necessário.

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 *et al.*, 1999).

A literatura propõe a utilização de sistemas inteligentes na tarefa de processamento de alarmes e estimação de seção em falta. Entre as diversas técnicas de Inteligência Artificial (IA), destacam-se os sistemas especialistas (ZHAO *et al*., 2005); as redes neurais (EL-

SAYED *et al.,* 2000; SOUZA *et al.,* 2000; ZHANG *et al*., 2009); a lógica difusa (LEE *et al*., 2000; MEZA, et, al, 2001; SOUZA *et al*., 2004); e outros métodos, tais como, algoritmos genéticos, simulated annealing, tabu search. A programação matemática e técnicas heurísticas (SADEGHEIH, 2009), além de Bayes (ZHANG, 2008) também são utilizados.

Usualmente, sistemas especialistas, redes neurais, algoritmos genéticos, grafos estruturados, lógica *fuzzy* e Redes de Petri são as técnicas sugeridas ao processamento de alarmes. Dentre estas o algoritmo genético tem se destacado, mostrando eficiência na tarefa de processamento de alarmes e estimativa de seção em falta. Porém, é uma técnica heurística, onde problemas com mínimos locais, ajuste de parâmetros, incerteza de convergência criam empecilhos para sua utilização em um sistema real. Métodos exatos, como Programação Inteira (PI), têm sido relegados a um segundo plano. No entanto, recentes desenvolvimentos em resolvedores (*solvers*) para PI têm melhorado a capacidade destes resolverem instâncias de grande escala para diferentes tipos de problemas. Atualmente, o uso de PI ganha aceitação e é considerado uma ferramenta computacional poderosa para encontrar soluções ótimas ou quase-ótimas para problemas reais de planejamento estratégico ou operacional. Este trabalho propõe um método determinístico baseado em programação inteira binária para a solução do problema.

Conhecer as características dos métodos computacionais utilizados para solucionar o problema de processamento de dados e estimação da seção em falta é de fundamental importância para a escolha do mais adequado. Uma análise qualitativa é realizada de modo a destacar qual ou quais métodos são indicados. Desta maneira, identificou-se em quais as circunstâncias um método é mais apropriado do que o outro, de modo a auxiliar os engenheiros de proteção na escolha da melhor alternativa.

Neste capítulo é realizada uma breve descrição dos fundamentos das técnicas exploradas. São apresentadas as decorrências da associação entre algumas destas técnicas, que servirão de fundamento para a metodologia implementada por esta tese e apresentado no próximo capítulo.

3.2 GRNN (Generalized Regression Neural Network)

A minimização dos esforços humanos tem sido um dos objetivos da engenharia, que vem desenvolvendo técnicas e implementações que possam realizar as mesmas tarefas que o homem. Dentre essas técnicas e implementações, encontram-se as Redes Neurais, que devido à capacidade de aprendizado, generalização e classificação, são utilizadas em reconhecimento de padrões, controle, modelagem, aproximação de funções, entre outras.

Uma rede neural é especificada com base nas características de um problema, sendo esta treinada a partir de uma base de casos reais ocorridos, de modo que a mesma seja capaz de estimar situações futuras.

As redes neurais são compostas por nós semelhantes a neurônios humanos, que recebem informações e as transferem mediante conexões ponderadas.

A topologia da GRNN (*Generalized Regression Neural Network*) pode possuir múltiplas camadas interconectadas, como mostra a Figura 3.1.

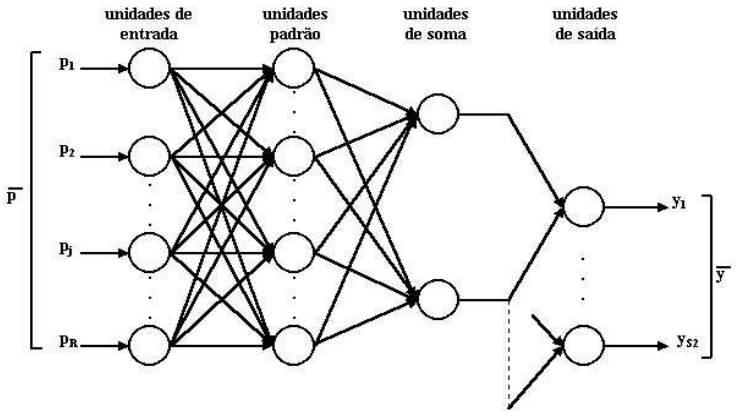


Figura 3.1 – Rede GRNN

Cada neurônio da unidade padrão é um centro de agrupamento, sendo que o número de neurônios dessa camada é igual ao número de exemplares utilizados para representar o conhecimento.

Quando um novo padrão é apresentado à rede, é calculada a distância entre esse e os exemplares previamente armazenados. O valor absoluto destas diferenças é somado e multiplicado pelo *bias*, sendo então enviado a uma função de ativação não linear (CARDOSO Jr., 2003). Uma exponencial é utilizada como função de ativação, sendo o *bias* ajustado para

0.8326/*spread*, onde *spread* é o espalhamento, ou a abertura da função de base radial utilizada, como pode ser visto na Figura 3.2.

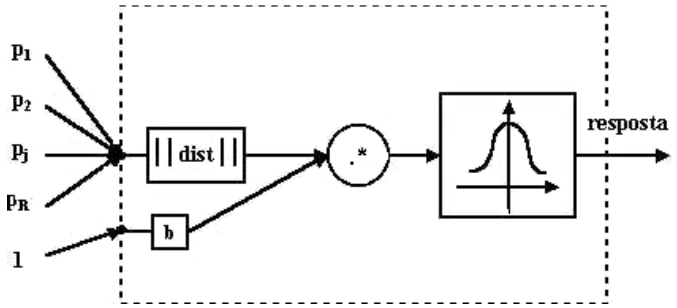


Figura 3.2 - Unidade Padrão da GRNN

A performance da rede é influenciada pelo ajuste do *bias* (*spread*) e pelos padrões armazenados. Portanto, para um valor de *spread* muito grande a rede passa a generalizar demasiadamente, enquanto que um valor muito pequeno torna a rede incapaz de generalizar (SPECHT, 1991).

A rede GRNN pode ser utilizada para fins de previsão, modelagem, mapeamento, interpolação ou controle. O aprendizado em um único passo é uma das principais vantagens da GRNN (SPECHT, 1991).

Deve-se lembrar que a topologia do sistema elétrico é frequentemente modificada, além da grande quantidade de sinais de entrada, isto geralmente acarreta dificuldades para a implementação das redes neurais. Estas modificações não podem ser facilmente refletidas em uma rede neural.

O treinamento e teste das redes são geralmente feitos com dados históricos de operação (ELSAYED & ALFUHAID, 2000; FRISCH; CARDOSO; ARRUDA, 1997; BATISTA, 2005; COUTTO FILHO *et al.,* 1999). Um grande problema pode surgir no caso de um conjunto incompleto de dados históricos. Por exemplo, se uma família de eventos que constitui uma determinada região no espaço não consta na base (nunca ocorreu nenhum evento deste tipo), a RNA pode não ser capaz de "aprender" este padrão, produzindo um resultado incorreto.

Uma metodologia que combina RNA e sistemas *fuzzy* para processamento de alarmes e identificação de componentes defeituosos é apresentada por SOUZA *et al.*(2004). Relações *fuzzy* são estabelecidas, e formam uma base de dados empregada para treinar RNA. Esta, por sua vez, recebe como entradas padrões de alarmes, produzindo como saída a estimativa do grau de pertinência de um equipamento específico à classe dos componentes defeituosos.

A rede neural GRNN (*Generalized Regression Neural Network*) devido sua característica de generalização, treinamento simples e rápido e de fornecer respostas múltiplas se mostrou a mais adequada ao processamento de alarmes, como mostra o trabalho apresentado por MACHADO *et. al*, (2009) que realizou uma análise comparativa entre as diversas arquiteturas de redes neurais.

3.3 Algoritmo Genético (AG)

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são algoritmos de otimização e busca, fundamentados nos mecanismos de seleção natural e genética. As origens dos princípios do AG são inspiradas na teoria da evolução que remontam ao século19, nos trabalhos de Charles Robert Darwin. A observação da natureza dos organismos vivos leva a concluir que estes são "consumados solucionadores de problemas" (HOLLAND, 1992). A teoria emula o processo da natureza onde os mais aptos vencem e se reproduzem e, consequentemente, os mais fracos se extinguem. Assim, os AGs podem ser definidos como procedimentos computacionais de busca e otimização, cujo funcionamento é inspirado nos processos naturais de seleção e refinamento genético (GOLDBERG, 1989). Estes algoritmos foram inicialmente propostos por JOHN H. HOLLAND e sua equipe na Universidade de Michigan, na década de 60.

A evolução das espécies pode ser vista como um mecanismo adaptativo de otimização que envolve certa aleatoriedade (TANOMARU, 1995). Os AGs empregam diversas metáforas biológicas para descrever conceitos computacionais associados.

Os AGs pertencem à classe dos métodos probabilísticos de busca e otimização, embora não sejam uma mera busca aleatória. Como características que diferenciam o AG de outros métodos de otimização, destacam-se (TANOMARU, 1995):

- O AG trabalha com um conjunto de pontos (soluções-candidatas) para um dado problema, e não sobre pontos isolados. Este conjunto é denominado "população". Em contrapartida, cada ponto da população é denominado "indivíduo".
- Normalmente o AG opera em um espaço de soluções codificadas, e não diretamente no espaço de busca. Estas soluções são codificadas em sequências denominadas "cromossomos" ou "*strings*". Cada elemento do cromossomo é denominado "gene".
- O AG requer apenas informação sobre a função-objetivo a ser otimizada, para cada membro da população. Informações adicionais, como derivadas e gradiente são

desnecessárias. A função-objetivo, na metáfora biológica, representa o meio no qual o indivíduo está inserido. Através dela é determinado o quanto um indivíduo está "adaptado ao ambiente", ou seja, o quanto que é boa uma determinada solução. Esta medida é chamada de *fitness* ou adequabilidade.

- O AG utiliza regras de transição probabilísticas, e não determinísticas. Cada indivíduo tem uma certa probabilidade de ser selecionado e passar adiante seu material genético. Normalmente esta probabilidade é proporcional ao valor do *fitness*.

O método empregado pelo AG consiste inicialmente de uma população formada por uma série de *bits* (*string* - representando os cromossomos), que é transformada por três operadores genéticos: seleção, reprodução e mutação (GOLDBERG, 1989).

Cada *string* (cromossomo) representa uma possível solução do problema a ser otimizado, e cada *bit* (ou grupo de *bits*), representa o valor associado a determinadas variáveis do problema (gene). As soluções são classificadas por uma função de aptidão (*fitness*) que desempenha o papel do ambiente. O par cromossomo e função de aptidão representam o indivíduo (GOLDBERG, 1989).

WEN *et al.* (1995) propõe pela primeira vez um método de processamento de alarmes baseado na otimização de uma função-objetivo através de um algoritmo genético. Esta função-objetivo reflete um critério matemático formal que descreve o problema do processamento de alarmes. Posteriormente o problema é analisado sob a luz da teoria de MFD (*Multiple Fault Diagnosis* - Diagnóstico de Múltiplas Faltas) (WEN & CHANG, 1996).

O princípio de utilização do AG é dado por um processo onde se gera uma população inicial aleatoriamente, avalia-se esta, e criam-se novas populações por meio de operadores genéticos. Os indivíduos com bom desempenho são selecionados e partes destes são combinadas, criando cópias mais fortes, simplesmente pelo uso de seleção e reprodução. Apesar desta aparente simplicidade, cabe ressaltar que o processo de busca exige uma substancial força computacional que podem inviabilizar sua utilização em aplicações *on-line* (WEN& HAN, 1995).

3.3.1 Seleção

O operador de seleção seleciona indivíduos da população anterior que vão participar das etapas de cruzamento e mutação, formando assim uma nova geração. Tal seleção é influenciada no sentido de escolher os indivíduos com aptidão acima da média como matrizes para os membros da nova população (MIRANDA *et al.*, 1998).

O processo de seleção pode ser implementado de vários modos, sendo o sorteio através de uma roleta, que tem áreas proporcionais à aptidão dos indivíduos, o mais utilizado (WEN & CHANG, 1997).

3.3.2 Combinação

A combinação ou cruzamento (*crossover*) é o principal operador genético de reprodução e consiste na troca de porções de cromossoma entre dois indivíduos, cuja função principal é explorar novas partes do espaço de busca. Existem diferentes tipos de operadores de cruzamento, tais como, combinação em um ponto, dois pontos e uniforme (WEN & HAN, 1995).

Nem todos os indivíduos realizam a combinação, sendo esta frequentemente controlada por uma probabilidade de reprodução (MIRANDA *et al.*, 1996). Tal probabilidade deve ser um valor grande, tipicamente, entre 0,6 e 0,9 (WEN & HAN, 1995).

3.3.3 Mutação

A mutação também é um operador importante e consiste na troca aleatória de um ou dois *bits* da *string* utilizada na representação do indivíduo pelo seu complemento (na representação binária). Este operador deve ser utilizado com um pouco de cuidado, com baixa probabilidade, tipicamente, 0,0001 reprodução (MIRANDA *et al.*, 1998), ou entre 0,001 e 0,1 (WEN & CHANG, 1997).

A mutação serve como uma espécie de "garantia de vida". Algum importante bit (gene) pode ser perdido durante a seleção, cabendo à mutação, a possibilidade em recuperá-lo (MIRANDA *et al.*, 1998). Além disto, em alguns casos, as *strings* de uma população podem apresentar o mesmo valor em cada bit, sendo a reprodução incapaz de introduzir novos indivíduos (WEN & HAN, 1995).

Todavia, a ocorrência constante de mutação pode ser prejudicial, levando a uma busca aleatória (uma probabilidade de mutação de 0,5 sempre implica em busca aleatória, independentemente da probabilidade de reprodução) (MIRANDA *et al.*, 1996).

As seguintes etapas são seguidas por um algoritmo genético típico (MIRANDA *et al.*, 1998):

1. Inicio
2. Gerar aleatoriamente uma população inicial (população anterior)

3. Para gerações de 1 a MG (máximo número de gerações permitidas, ou outros possíveis critérios de parada)

   Avaliar (população anterior)

   Nova população= Selecionar (população anterior)

   Reprodução (nova população)

   Mutação (nova população)

   População anterior= população nova

4. Fim

O fluxograma apresentado na Figura 3.3 mostra de modo geral o funcionamento de um Algoritmo Genético.

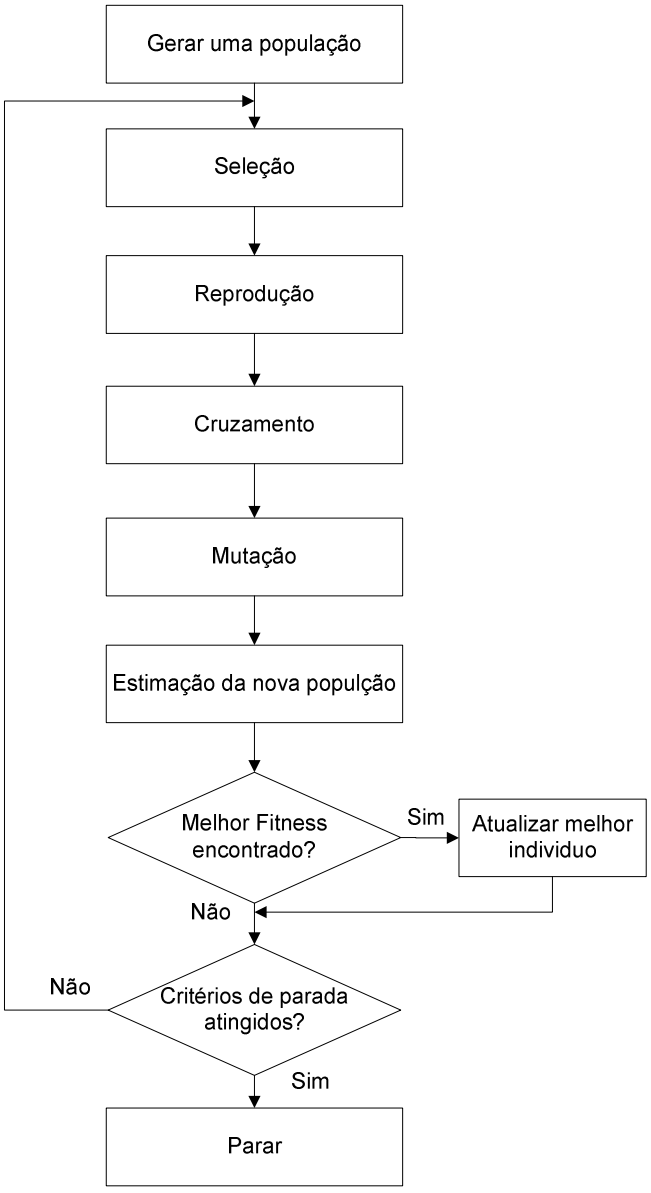


Figura 3.3 - Fluxograma Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos constituem um processo relativamente simples, onde se gera uma população inicial aleatoriamente, avalia-se esta, e criam-se novas populações por meio de operadores genéticos (MIRANDA *et al.*, 1996). Os algoritmos genéticos tendem a selecionar indivíduos com bom desempenho e combinar partes destes, criando cópias mais fortes, simplesmente pelo uso de seleção e reprodução (MIRANDA *et al.*, 1998). Apesar desta aparente simplicidade, estes exigem uma substancial força computacional durante o processo de busca (WEN & HAN, 1995).

Métodos de processamento de alarmes baseados em algoritmos genéticos (WEN; CHANG; SRINIVASAN, 1995; WEN & CHANG, 1998; NEIS *et al.,* 2005) têm a vantagem de poder encontrar múltiplas soluções globais ótimas (ou próximas das soluções ótimas) de maneira direta e eficiente, especialmente em casos de alarmes falsos e/ou não reportados, onde diferentes combinações de eventos podem produzir o mesmo conjunto de alarmes.

3.4 Heurística Construtiva (HC)

Conforme ZANAKIS & EVANS (1981), a palavra heurística é derivada do grego "heuriskein" e significa aquilo que serve para descobrir ou decoberta.

No entendimento de ZANAKIS & EVANS (1981), as heurísticas são compreendidas como algoritmos que apresentam bons desempenhos ou soluções factíveis de modo fácil e rápido para vários problemas, mas que não apresentam provas de serem sempre rápidas e eficientes em todos os problemas. GOLDBARG & LUNA (2005) complementam essa definição destacando que as heurísticas são capazes de garantir boas soluções ou até mesmo a otimalidade da solução encontrada, especialmente nas ocasiões em que a busca se inicia a partir de uma solução viável próxima do ótimos. Além disso, de acordo com SILVER *et al.* (1980) e SILVER (2004), as heurísticas podem ser classificadas em construtivas quando acrescentam componentes individuais à solução inicial até a obtenção de uma solução factível.

"Heurística é parte de um algoritmo de otimização que utiliza informações particulares de um problema para ajudar a decidir como uma solução é construída. Heurísticas são geralmente de classe de problemas dependentes." (THOMAS WEISE, 2009).

A heurística construtiva (HC) é um procedimento desenvolvido através de um modelo cognitivo, usualmente através de regras baseadas na experiência dos desenvolvedores. Ao

contrário dos métodos exatos, que buscam encontrar uma forma algorítmica de achar uma solução ótima através da combinação ou busca de todas as soluções possíveis, as heurísticas normalmente tendem a apresentar certo grau de conhecimento acerca do comportamento do problema, gerando um número muito menor de soluções (CORDENONSI, 2008).

Uma Heurística Construtiva (HC), de modo geral, consiste em tentar encontrar uma boa resposta a um determinado problema, considerando a cada iteração somente o próximo passo, ou seja, o critério de escolha é basicamente local. O ponto de partida é uma solução vazia e, a cada passo da construção, um conjunto de dados é considerado, inserindo sempre um dado de cada vez, até que a solução esteja completa. Algoritmos construtivos não possuem nenhum esquema de *backtracking*, ou seja, após inserir um dado, não é possível retirá-lo da solução.

Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável. Algumas definições de heurísticas encontradas na literatura são citadas a seguir (CORDENONSI, 2008):

> *...procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que sesupone ofrecerán una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido.*
>
> (ZANAKIS & EVANS, 1981 *apud* DIAZ *et al.*, 1996)

> *Para resolver eficientemente muitos problemas difíceis, geralmente é necessário comprometer as exigências de mobilidade e sistematicidade e construir uma estrutura de controle que não garanta encontrar a melhor resposta,mas que quase sempre encontre uma resposta muito boa. ... a heurística é uma técnica que melhora a eficiência de um processo de busca, possivelmente sacrificando pretensões de completeza.*
>
> (RICH & KNIGHT, 1993 *apud* CORDENONSI, 2008)

Existem muitos fatores que tornam interessante a utilização de algoritmos heurísticos na resolução de um determinado problema (DIAZ *et al.*, 1996):

– quando não existe um método exato para a resolução deste problema ou o mesmo requer um tempo muito alto de processamento. Neste caso, oferecer uma solução boa é melhor do que não ter nenhuma solução;

– quando não é necessária a solução ótima, pois as soluções obtidas já são razoáveis;

– quando os dados são pouco confiáveis. Neste caso, a busca pela solução ótima não tem sentido, pois a mesma será uma aproximação da realidade;

– quando limitações de tempo e/ou dinheiro obriguem a utilização de métodos de resposta rápida;

– como passos intermediários de outros algoritmos, potencialmente exatos ou heurísticos.

Algoritmos heurísticos ou heurísticas são procedimentos que em um curto período de tempo conseguem encontrar soluções razoáveis, sem garantias se otimalidade.

Dada uma instância de um problema de otimização, as heurísticas construtivas constroem uma solução viável para o problema, onde:

- Somente a viabilidade da solução é garantida;
- A princípio, nenhuma propriedade relacionada a qualidade da solução construída é exigida.

Entretanto, espera-se que uma heurística seja projetada de forma a almejar soluções que sejam próximo da solução ótima para o problema.

A heurística construtiva gulosa é a forma mais simples e mais utilizada para se projetar uma heurística construtiva para um problema de otimização, pois parte de uma solução vazia e adiciona sequencialmente elementos a solução através de algum critério (função de avaliação) guloso. Ao final, é gerada uma solução viável. Pode-se dizer que a heurística construtiva gulosa trata-se de um algoritmo míope, pois avalia somente um elemento da solução de cada vez.

3.5 Programação Inteira (PI)

Um problema de Programação Inteira é um caso particular de problemas de otimização no qual as variáveis só podem assumir valores inteiros (discretos); um problema de Programação Inteira Mista é outro caso particular no qual apenas uma parte das variáveis está restrita a valores inteiros. Um subconjunto desta classe de problemas ocorre quando as variáveis do problema estão restritas a apenas dois valores (zero e um, por exemplo), constituindo a programação binária ou zero-um.

Existem diferentes abordagens para resolução de problemas de programação inteira. Entre os métodos exatos de resolução estão *branch-and-bound*, programação dinâmica,

métodos baseados em relaxação lagrangeana, e métodos baseados em programação linear e inteira, tal como *branch-and-cut, branch-and-price, e branch-and-cut-and-price*. Estas técnicas são projetadas para serem flexíveis e independentes de domínio, a fim de serem aplicáveis a uma grande variedade de problemas práticos sem a necessidade de projetar estratégias específicas. De fato, em ambientes reais, flexibilidade é frequentemente um fator crítico para responder prontamente às trocas de requisitos.

Muitos dos métodos citados acima são implementados em resolvedores (solvers) de otimização como CPLEX, LINDO, XPRESS, MINTO. Atualmente esses aplicativos conseguem tratar, de forma eficiente, instâncias de problemas de programação inteira com dimensões suficientemente grandes para serem úteis em aplicações práticas. O trabalho (Jünger *et al.*, 2010) apresenta um estudo sobre a evolução destes métodos nos últimos 50 anos.

3.6.3 Modelos de programação inteira

FLISKOUNAKIS *et al*., (2007) apresenta para um sistema de potência a influência da topologia na redução de perdas como sendo um problema de programação linear inteira mista.

Seja A uma matriz binária mxn e w um vetor n-dimensional de pesos. O problema de recobrimento (PR), o problema de particionamento (PP) e o problema de empacotamento (PE) são problemas de programação binária com a seguinte formulação:

(PE)	(PP)	(PR)
$max\ w^T x$	$min\ w^T x$	$min\ w^T x$
s.a.	s.a.	s.a.
$A\,x \leq 1$	$A\,x = 1$	$A\,x \geq 1$
$x \in n\{0,1\}^n$	$x \in n\{0,1\}^n$	$x \in n\{0,1\}^n$

O trabalho apresentado por COSLOVICH *et al.,* (2006) mostra o problema de particionamento aplicado em grande escala com instâncias reais (mundo real) lembrando que o particionamento é um modelo fundamental de otimização combinatorial, também conhecido por se um problema NP-difícil (*NP- hard*).

Um problema de Programação Linear Inteira (PLI) é um problema de Programação Linear (PL) em que todas ou alguma(s) das suas variáveis são discretas (só podem assumir

valores inteiros). Quando todas as variáveis estão sujeitas à condição de integralidade tem-se um problema de Programação Linear Inteira Pura (PLIP); se apenas algumas variáveis estão sujeitas à condição de integralidade trata-se de um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). A Programação Inteira (PI) também inclui a Programação Não-Linear Inteira, mas o estudo desta está fora do escopo deste trabalho. (ARENALES *et al.*, 2007)

Os modelos de PLI são semelhantes aos modelos de PL, sujeitos a restrições adicionais de domínio discreto, conforme exemplo apresentado a seguir:

$$\text{PI}\left|\begin{array}{l}\max\ Z = 4x_1 + 5x_2 \\ \text{s.a.} \\ \quad 2x_1 + 3x_2 \le 8 \\ \quad 5x_1 + 2x_2 \le 11 \\ \quad x_1, x_2 \ge 0 \text{ e inteiras}\end{array}\right.$$

Quando as variáveis inteiras podem apenas assumir os valores 0 (zero) e 1 (um), o modelo diz-se de Programação Inteira Binária (PIB). As variáveis binárias são extremamente úteis para exprimir situações dicotômicas (sim ou não).

$$x_j = \begin{cases} 1 \text{ se a escolha j for sim} \\ 0 \text{ se a escolha j for não} \end{cases}$$

De uma forma geral, os modelos de PI podem ser representados na forma que segue.

$$\max cx + dy$$
$$s.a.$$
$$Ax + Gy \le b$$
$$x \ge 0 \text{ e inteiro}, y \ge 0$$

Em que x são variáveis inteiras e *y* são varáveis contínuas. As matrizes *A* e *G* correspondem aos coeficientes das restrições relativas às variáveis inteiras e contínuas, respectivamente.

De acordo com a representação geral de um PI, um PIB pode ser expresso como:

$$\max dx$$
$$s.a.$$
$$Ax \le b$$
$$x \in \{0,1\}^*$$

É de interesse para o presente trabalho a classe de problemas de programação binária conhecidos como problema de cobertura, particionamento e empacotamento.

$$\min c^T x \quad \text{(CR1)}$$
$$Ax \geq \text{ou } = \text{ou} \leq 1 \text{(CR2)}$$
$$x \in \{0,1\}^n \text{(CR3)}$$

Assim, dependendo da desigualdade ou igualdade selecionada em CR2, dentro da programação inteira podem ser definidos três problemas distintos: cobertura, empacotamento e partição.

Um problema de cobertura para *S* requer que a união dos subconjuntos seja igual a *S*. Desta forma uma cobertura para *S* seria $S_1 \cup S_2 = S$.

Os modelos de cobertura seguem a seguinte expressão:

$$\min c^T x$$
$$Ax \geq 1$$
$$x \in \{0,1\}^n$$

Um empacotamento de *S* envolve a união de subconjuntos disjuntos, por exemplo, S_2 e S_3, onde $S_2 \cap S_3 = \emptyset$.

Os modelos de empacotamento seguem a seguinte expressão:

$$\min c^T x$$
$$Ax \leq 1$$
$$x \in \{0,1\}^n$$

Uma partição de *S* é uma cobertura e um empacotamento com relação a *S*. Os subconjuntos S_3, S_4 e S_5 são uma partição de *S,* pois $S_3 \cup S_4 \cup S_5 = S$ e $S_3 \cap S_4 \cap S_5 = \emptyset$. Os modelos de partição seguem a seguinte expressão:

$$\min c^T x$$
$$Ax = 1$$
$$x \in \{0,1\}^n$$

3.5.2 Métodos de resolução

Devido ao número finito de possíveis soluções, uma das formas de se obter uma solução ótima de um problema de programação inteira (PI), seria usar uma busca exaustiva. Esta busca é denominada enumeração completa, onde é calculado o valor de função para todas as soluções factíveis, e é escolhido o maior ou menor valor dependendo se é uma função de maximização ou de minimização. Em um problema com n variáveis teríamos 2^n possíveis soluções para um o problema (ARENALES *et. al,* 2007).

Porém, para tornar possível a aplicação da PI em métodos reais, não é possível enumerar todas as possíveis soluções e dentre estas achar o melhor valor de função objetivo. Assim foram criados métodos capazes de reduzir o espaço de busca e tornar aplicável a PI para problemas reais como o processamento de alarmes. Dentre estes métodos estão o método de arredondamento e a enumeração implícita, conhecida também como método *branch-and-bound.*

3.5.2.1 Método de arredondamento

A técnica de arredondamento sugere relaxar o problema de programação inteira em uma programação linear, e resolvê-lo desta forma. Por fim, se a resposta satisfizer às restrições de inteiros a solução é uma solução ótima para a PI, caso contrário sugere o simples arredondamento das variáveis não inteiras. O exemplo a seguir mostra o funcionamento do arredondamento

Max$Z = 21x_1 + 11x_2$

Sujeito a $7x_1+4x_2 \leq 13$, onde x_1 e x_2 são valores inteiros não negativos.

Relaxando o problema de PI para um problema de PL, a melhor solução é x_1=13/7 e x_2=0, com Z=39. Fazendo o arredondamento da variável x_1 para que possa ser analisada a resposta para um problema de PI tem-se:

$x_1 = 2$ e x_2=0, é uma solução inviável, pois $14 \geq 13$

$x_1 = 1$ e x_2=0, com Z= 21 é uma possível solução, porém não ótima.

A solução ótima neste caso seria x_1=0, x_2=3 e Z=33, diferente do resultado dado pelo arredondamento. Mesmo que o método funcione para alguns casos, é fácil perceber que não é possível garantir uma solução ótima.

3.5.2.2 Método de branch-and-bound

Para reduzir o espaço de busca pode-se eliminar restrições do problema de PIB para fazer uma relaxação da PIB inicial, substituindo a restrição que obriga as variáveis x_j a serem binárias pela restrição $0 \leq x_j \leq 1$. Essa relaxação permite resolver o problema de PIB através de uma PL de menor proporção, para executar um procedimento denominado de enumeração implícita, onde os subconjuntos de soluções lineares são implicitamente considerados e descartados.

Para um problema de maximização, estas são eliminadas por terem o valor limite da função menor ou igual ao valor de máximo já encontrado, não sendo possível encontrar melhores resultados neste subproblema e seus derivados, ou por não respeitarem os limites de valor impostos no problema de PI, ou seja, o subproblema é infactível. Este tipo de estratégia é conhecido por "*dividir para conquistar"*, onde se divide o problema original em pequenos problemas de resolução mais fácil. O processo consiste em identificar limites para a qualidade da melhor solução num subconjunto, eliminando-o se for impossível este subconjunto conter a solução ótima.

3.6 Bayes

A Teoria de Bayes trata essencialmente do que acontece com a probabilidade de ocorrência de um evento caso outros ocorreram. Ou ainda, de maneira mais simplória, pode-se dizer que a teoria de Bayes descreve a forma de avaliar as probabilidades de ocorrência de um evento se algum outro evento também houvesse ocorrido. Bayes desenvolveu a teoria da probabilidade condicional para mostrar como a teoria da probabilidade poderia lidar não só com eventos independentes, mas também com eventos cujos resultados estão conectados.

A pesquisa realizada por WU *et al.,* (2005) propõe uma nova abordagem para o diagnóstico de faltas com base nas redes Bayesianas. Com informações de ordem temporal, são estabelecidos modelos de distribuição da rede Bayesiana que contenham o atributo ordem

temporal. Esta abordagem melhora altamente a precisão do diagnóstico sobre a falta e é especialmente adequado para aqueles ambientes com informação incompleta e incerta.

No caso de um único equipamento, os poucos alarmes fornecidos podem ocasionar muitas possibilidades de respostas a serem analisadas, pois as opções tornam-se muito semelhantes quando é levada em conta a probabilidade de erros nos alarmes recebidos. Para contornar este problema, o uso de dados estatísticos sobre faltas e falhas nos equipamentos de proteção pode ser muito úteis. Porém nem sempre o acesso a este tipo de informação é possível, pois poucas concessionárias de energia possuem e ou se preocupam em possuir. Desta forma, métodos capazes de obterem boas respostas sem este tipo de conhecimento tornam-se necessários.

A classificação das faltas por conceitos de probabilidade exige dados estatísticos sobre a frequência das diferentes faltas e suas probabilidades, bem como a operação da proteção e suas probabilidades.

GELMAN *et al.* (2004) destaca que o teorema de Bayes permite o cálculo desejado das probabilidades de diferentes eventos através da equação (3.1):

$$p(F_i|P_i) = \frac{p(F_i)\, p(P_i|F_i)}{\sum_{j=1}^{n} p(F_j)p(P_j|F_j)} \tag{3.1}$$

Onde:

$p(F_i|P_i)$ = probabilidade posterior de Fi (probabilidade da hipótese Fi dada a observação Pi), isto representa a atualização o grau de confiabilidade;

$p(F_i)$ = probabilidade prévia de Fi (probabilidade da hipótese Fi antes da observação Pi);

$p(P_i|F_i)$ = probabilidade de risco de Fi (probabilidade de uma dada observação de uma hipótese). Em outras palavras, a probabilidade de que a hipótese confere à observação;

$p(F_j)p(P_j|F_j)$ = representa a probabilidade incondicional.

Matematicamente, o teorema de Bayes dá a relação entre as probabilidades de Fi e Pi e as probabilidades condicionais de Fi dado Pi e de Pi dado Fi. Assim, muitas vezes, por alguma partição {Fi} do espaço de evento, o espaço é dado evento ou concebidas em termos de $p(F_i)$ e $p(P_i|F_i)$. Assim, usando a lei da probabilidade total equação 3.2, elimina-se $p(P_i)$ e substitui-se:

$$p(F_j)p(P_j|F_j) \tag{3.2}$$

ZAUK *et al.*, (2010) explorou algumas técnicas computacionais para a classificação de eventos. No trabalho foram analisados os métodos da Heurística Construtiva, Matriz Inversa, Matriz Direta, Aproximação de Bayes e Redes Neurais Artificiais (GRNN). Durante o estudo foram utilizados padrões que descrevem os modos de disparo da proteção de um transformador de força. Para avaliar os métodos foram consideradas características importantes e fundamentais para a análise de faltas com o uso de ferramentas computacionais, ou seja, tempo de processamento, precisão de resultados e praticidade de implementação em um sistema real. Convém salientar que foi utilizado o método de Bayes como a base de comparação para os demais métodos devido à sua característica probabilística.

Ainda, ZAUK *et. al.*, (2010) destacou que modelos capazes de distinguir possíveis alarmes falsos e falhos na ausência das taxas probabilísticas tornam-se imprescindíveis, uma vez que estas não são facilmente obtidas. Assim, o método de Bayes pode não ser bom para aplicações de ordem prática, devido às dificuldades de se obter informações ou dados probabilísticos sobre as falhas e operação dos equipamentos de proteção.

3.7 Híbridos

Nesta subseção são apresentados alguns trabalhos com características híbridas devido à associação de métodos para resolver o problema de processamento de alarmes e estimativa de seção em falta.

3.7.1 *GRNN Associado ao AG*

Os trabalhos (FRITZEN *et. al*., 2009; FRITZEN *et. al*, 2010a; FRITZEN *et. al*, 2010b) apresentam uma metodologia para resolver o problema de processamento de alarmes e diagnóstico de faltas em nível de sistema de controle por meio da integração de duas técnicas, ou seja: as Redes Neurais Artificiais (RNAs) e os Algoritmos Genéticos (AGs).

As redes neurais foram utilizadas com o objetivo de inferir, com base nas sinalizações de disparo de relés, se a proteção do equipamento operou no modo seletivo ou não seletivo. Por meio desta estratégia conseguiu-se reduzir significativamente o número de mensagens associadas aos relés de proteção.

Os AGs foram utilizados de modo a representar a filosofia de proteção como um todo relacionando a saída das redes GRNN com os disjuntores. Por meio desse foi possível

modelar o modo como as proteções dos diversos equipamentos de rede "enxergam" o defeito durante uma falta.

Os resultados mostram que o método proposto é promissor, pois é capaz de lidar com as incertezas inerentes ao problema, além de tratar de modo natural a possibilidade de ocorrência de faltas simultâneas.

Assim, a implementação do sistema hibrido que envolveu a RNA associada ao AG e apresentado em FRITZEN *et al.* (2009) utilizou o sistema elétrico teste mostrado na Figura 3.4, que é o mesmo sistema empregado em (WEN & HAN, 1995; WEN; CHANG; SRINIVASAN, 1997). Os algoritmos que compõem a ferramenta proposta foram implementados no MatLab®.

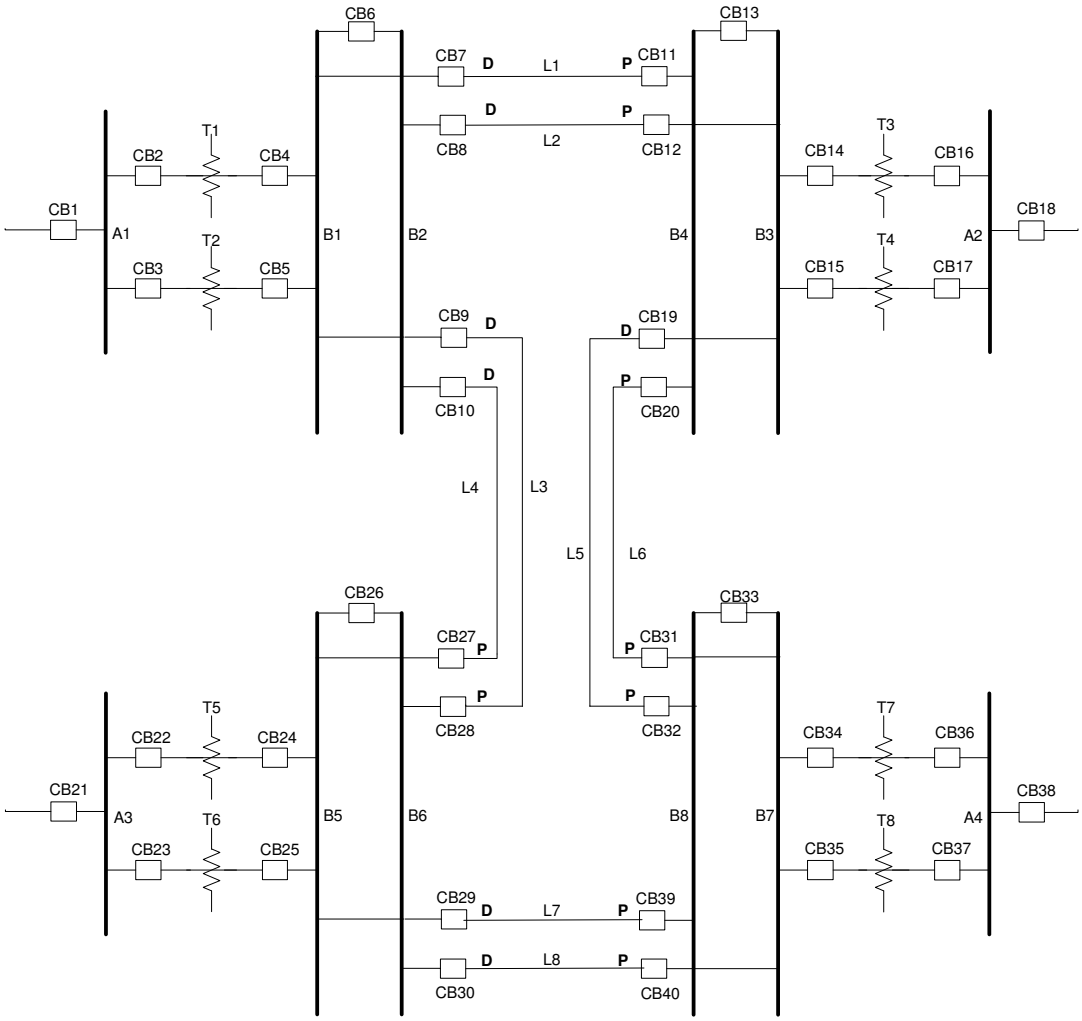


Figura 3.4 – Sistema Teste

3.7.1.1 Conjuntos de Treinamento da Rede GRNN

Foram treinadas 05 redes GRNN. Uma para cada equipamento (transformador, linha e barra) e duas redes GRNN destinadas à modelagem da teleproteção, que são utilizadas na rede GRNN da linha de transmissão.

As redes GRNN da teleproteção identificam se a teleproteção operou para uma falta dentro ou fora da linha, já que o esquema de bloqueio por portadora é passível de disparo indevido para faltas externas. Caso a teleproteção tenha operado para uma falta dentro da linha, é identificado o lado que a linha operou (D ou P). As saídas destas redes são incorporadas a rede GRNN das Linhas de Transmissão.

As saídas das redes foram codificadas da seguinte forma: nas Barras, Proteção Seletiva de Barras (PSB) e Proteção de Sob e/ou Sub Tensão na Barra (PSSTB); nas Linhas, Proteção Principal de Linha (PPL), Falta externa em direção ao lado D (FextLD) e Falta externa em direção ao lado P (FextLP); e nos Transformadores, Proteção Seletiva do Transformador (PST) e Proteção Não Seletiva do Transformador (PNST).

Cada neurônio de entrada representa um relé de proteção e cada neurônio de saída representa uma classificação sobre o tipo de proteção. A representação binária foi utilizada para representar os vetores de entrada. Assim, o valor binário "1" foi utilizado para indicar a recepção de alarme associado, enquanto que o valor "0" foi utilizado para indicar a não recepção de alarme. A rede somente é ativada se algum alarme for recebido.

No treinamento das redes GRNN foram realizados os ajustes no valor do spread, através de verificação, e depois de vários testes chegou-se a um valor satisfatório para spread igual a 0,3 para a rede neural das barras, 0,37 para a rede neural do transformador, 0,35 para a rede neural da linha de transmissão, e para as duas redes da teleproteção o valor utilizado foi de 0,5. A Tabela 3.1 mostra alguns dos casos utilizados no treinamento da rede neural que representa os transformadores.

A rede GRNN foi escolhida, por ter um processo de treinamento rápido, que matematicamente ocorre em um único passo. Essa característica é ideal em aplicações envolvendo sistemas reais, pois facilita a inclusão de novos padrões de treinamento e customização para outros equipamentos com lógicas de relés diferenciadas.

Tabela 3.1 - Lógica de operação dos relés associados ao transformador

Relés	Casos																								
	1	2	3	...	16	17	18	19	20	...	32	33	34	...	96	97	...	112	113	...	126	127
87	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0	...	0	0	...	1	1
63 T	0	0	0	...	0	0	0	0	1	...	0	0	0	...	0	0	...	0	0	...	1	1
63 VS	0	1	1	...	0	0	1	1	0	...	0	0	1	...	0	0	...	0	0	...	1	1
63 C	1	0	1	...	0	1	0	1	0	...	0	1	0	...	0	1	...	0	1	...	0	1
51 D	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	1	1	...	1	1	...	1	1
51 P	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	1	1	1	...	1	1	...	1	1	...	1	1
51 Np	0	0	0	...	1	1	1	1	1	...	0	0	0	...	0	0	...	1	1	...	1	1
Tipo	A	A	A	...	B	A	A	A	A	...	B	A	A	...	B	A	...	B	A	...	A	A

A – Proteção Seletiva (PS) B – Proteção Não Seletiva (PNS)

3.7.1.2 Parametrização do Algoritmo Genético

Nesta etapa de configuração e teste do AG a filosofia de proteção é modelada. Deste modo, a função do AG é analisar a lógica de proteção do sistema de modo integrado. Para tal, são consideradas as saídas das redes neurais e os estados dos disjuntores (CB).

A função objetivo utilizada é semelhante à proposta por WEN; CHANG; SRINIVASAN (1997). O critério que reflete as exigências para resolver o problema de estimação da seção em falta é fundamentado no "Princípio da Parcimônia", ou "Navalha de Occam" afirma que a explicação para um dado fenômeno deve fazer tão poucas suposições quanto possível sobre suas causas, eliminando hipóteses desnecessárias. Ou seja, hipótese mais simples capaz de explicar os alarmes recebidos deve ser a solução. Isto implica na opção por uma solução mais simples em detrimento de uma mais complexa, quando ambas apresentarem o mesmo desempenho.

Desta forma utiliza-se um critério minimizador, cuja função objetivo pode ser formulada matematicamente pela seguinte expressão (WEN & CHANG, 1997):

$$\text{Min } f(E) = w1[\Delta A] + w2[\Delta B] + w3[E] \tag{3.3}$$

Onde:

A variável E é a hipótese expressa em forma de vetor de ne elementos. Cada elemento do vetor E representa o estado de um evento incluído em Es, recebendo 0 (se o evento não ocorreu) e 1 (se o evento ocorreu). Sendo Es a matriz coluna de eventos do sistema.

w1, w2, w3= coeficientes positivos de pesos, que irão definir a importância relativa de cada termo;

ΔA é um vetor de *na* elementos e depende de outros dois vetores, Ar e Am(E). Ar é o vetor de alarmes recebido (0 representa o alarme não recebido e 1 o recebido) e Am(E) é o vetor de alarmes esperados para os eventos que compõem E. O vetor ΔA é determinado da seguinte maneira: se o elemento *jth* do vetor Ar for 0, então o elemento *jth* de ΔA recebe 0. Se o elemento *jth* dos vetores Ar e Am(E) forem 1, então o elemento *jth* do ΔA recebe 0. Os outros bits do vetor recebem 1. [ΔA] é o numero de não zeros contidos no vetor ΔA. Este termo verifica se E cobre todos os alarmes recebidos, representando a pequena possibilidade de um alarme recebido ser falso (WEN & CHANG, 1997).

ΔB é um vetor de *na* elementos e é determinado pela subtração dos elementos dos vetores Ar e Am(E), criando assim um vetor diferença. [ΔB] é a quantidade de não zeros do vetor ΔB. Este termo representa a inconsistência dos eventos dados como respostas e o evento ocorrido, representando a quantidade de alarmes não justificados pela resposta ou alarmes que estariam faltando no evento por alguma falha de comunicação.

[E] = quantidade de não zeros contida em E, representando o número de eventos que o compõem. Tomando a resposta mais simples como a mais correta. Seguindo o principio da parcimônia

Para o sistema teste da Figura 3.4 foram mapeados 108 alarmes e 132 eventos. Os padrões que relacionam os alarmes aos eventos, que constituem a base de conhecimento do AG, foram elaborados de acordo com o seguinte critério: uma falha de dispositivo de proteção (relé ou disjuntor) por vez.

Na Tabela 3.2 são apresentados 13 eventos, cada qual associado ao seu respectivo conjunto de alarmes esperados.

Existem vários parâmetros do algoritmo genético que podem ser escolhidos para melhorar o seu desempenho, adaptando-o às características particulares de cada problema. As taxas utilizadas pelo AG devem ser ajustadas conforme a necessidade do problema estudado. No entanto a forma como estas taxas são empregadas é definida nos tipos de operadores utilizados no AG, assim foi utilizado o *crossover* de ponto duplo e uma taxa de mutação uniforme.

O valor máximo de gerações foi utilizado afim de que mesmo para casos em que houvesse uma maior dificuldade de encontrar o valor mínimo de função objetivo, o algoritmo consiga chegar à melhor resposta possível. Porém a utilização de tantas gerações implica em um maior tempo de processamento, mesmo em casos em que o algoritmo consiga encontrar

rapidamente a solução mais adequada. Para evitar que o algoritmo fique rodando até o final das gerações foram utilizados dois critérios de parada diferentes. No primeiro o algoritmo deve parar assim que o valor de função objetivo chegue ao valor definido pela expressão (3.4), pois esta é a resposta ideal para o caso mais simples possível, onde todos os alarmes são explicados por somente um evento, acarretando em vetores nulos para ΔA e ΔB. O segundo critério de parada utilizado foi o de estagnação do valor da função objetivo, que consiste em parar de executar o algoritmo quando num determinado número de gerações não ocorrer melhoria no resultado do valor da função objetivo.

$$f = 1\ w3 \tag{3.4}$$

Tabela 3.2 - Relação entre eventos e alarmes

Evento	Alarmes Esperados	Diagnóstico	Detalhamento
1	PST1, CB2, CB4	Trafo T1	Atuação O.K.
2	PNST1, CB2, CB4	Trafo T1	Falha PST
5	PST2, CB3, CB5	Trafo T2	Atuação O.K.
33	PPL1, CB7, CB11	Linha L1	Atuação O.K.
36	PPL1, CB7, CB13, CB20, PSSTBB4	Linha L1	Falha no CB11
52	PPL5, CB19, CB33, CB39, PSSTBB8	Linha L5	Falha CB32
70	PSBA2, CB17, CB17, CB18, PSSTBA2	Barra A2	Atuação O.K.
86	PSSTBB1, CB4, CB5, CB11, CB12, CB27, CB28, PNST1, PNST2, FextL1D, FextL2D, FextL3D, FextL4D, PSSTBB2	Barra B1	Falha PSB
93	PSSTBB2, CB4, CB5, CB11, CB12, CB27, CB28, PNST1, PNST2, FextL1D, FextL2D, FextL3D, FextL4D, PSSTBB1	Barra B2	Falha PSB
104	PSBB4, CB11, CB13, CB20, PSSTBB4	Barra B4	Atuação O.K.
115	PSBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB39, FextL7D, PSSTBB5	Barra B5	Falha CB29
128	PSBB8, PSSTBB8, CB32, CB33, CB39	Barra B8	Atuação O.K.
131	PSBB8, CB31, CB32, CB34, CB35, CB39, CB40, PSSTBB8, PSSTBB7	Barra B8	Falha no CB20

Alguns dos testes aplicados a rede GRNN do transformador estão demonstrados na Tabela 3.3, que mostra a atuação da proteção seletiva ou não seletiva para cada conjunto de alarmes.

Tabela 3.3 - Resultados obtidos para o transformador pela GRNN

Evento	Alarmes recebidos	Diagnóstico	Resposta GRNN (PS / PNS)
16	51Np	PNS	0.0018 / 0.9977
19	63Vs, 63C,51Np	PS	1.000 / 0.000
34	63Vs, 51P	PS	0.9995 / 0.0005
48	51P, 51Np	PNS	0.0018 / 0.9982
67	63Vs, 63C,51D	PS	1.000 / 0.000
80	51D, 51Np	PNS	0.0018 / 0.9982
88	87, 51D, 51Np	PS	0.9995 / 0.0005
92	87, 63T, 51D, 51Np	PS	1.000 / 0.000

O método proposto foi analisado com base em diversos casos, mas a Tabela 3.3 mostra apenas 9 casos, juntamente com seus resultados. Os pesos utilizados para as constantes que definem a importância relativa a cada termo da função objetivo, ou seja w_1, w_2 e w_3 foram de 90, 30 e 10 respectivamente.

Tabela 3.4 - Resultados obtidos (AG)

Casos	Alarmes recebidos	Eventos que explicam os Alarmes Recebidos	Resultados Obtidos
1	PST2, CB3, CB5	E5	E5
2	PSBB8, CB31, CB32, CB34, CB35, CB39, CB40, PSSTBB8, PSSTBB7	E131	E131
3	CB2, CB4	E1 (faltando PST1)	E1 ou E2
4	PSSTBB2, CB4, CB5, CB11, CB12, CB27, CB28, PNST1, PNST2, FextL1D, FextL2D, FextL3D	E93(faltando FextL4D, PSSTBB1)	E86 ou E93
5	PSBB8, PSSTBB8, CB32	E128 (faltando CB33, CB39)	E128
6	PSBB8, CB24, CB25, CB26, CB27, CB31, CB32, CB34, CB35, CB39, CB40, PSSTBB8, PSSTBB7, PSBB5, PSSTBB5, FextL7D	E131 e E115	E131 e E115
7	PPL1, CB7, CB11, FextL1D	E33 (um alarme falso)	E33 e E34
8	PSBA2, CB16, CB17, CB18, PSSTA2, PSSTBB8	E70 (um alarme falso)	E70
9	PPL1, CB7, CB11, CB13, CB20, PSBB4, PSSTBB4	E33 e E104 ou E36 e E104	E33 e E104 ou E36 e E104

A seguir é apresentada uma análise dos casos apresentados na Tabela 3.5.

1 a 2: são casos simples, onde o conjunto de alarmes recebidos é idêntico ao conjunto de alarmes de um evento contido na base de dados do AG.

3 a 5: nestes, ao menos um alarme falhou, ou seja, não foi recebido. Apesar da falta destes alarmes o algoritmo identificou corretamente cada evento.

6: dois eventos simultâneos justificam corretamente os alarmes recebidos.

7: nestes um evento apenas não justifica completamente os alarmes, restando um alarme sem resposta. Como na implementação do AG foi utilizado o critério de que a probabilidade de um alarme recebido ser falsa é pequena, estes casos foram diagnosticados como sendo a combinação de dois eventos.

8: neste caso, o conjunto de eventos capaz de explicar os alarmes recebidos é constituído por um alarme a menos.

9: duas respostas com dois eventos cada, cobrem todos os alarmes recebidos.

O tempo de convergência do AG variou de acordo com o caso estudado. Nos testes mais simples onde o conjunto de alarmes recebidos era idêntico a um evento, o critério de parada foi o do menor valor possível da função objetivo, sendo assim necessário um menor tempo de processamento. Já nos testes mais complexos o critério de parada atingido foi o de estagnação do valor de melhor função objetivo, necessitando de um maior tempo de processamento para que houvesse a convergência.

Tabela 3.5 - Avaliação dos parâmetros

	População 1200 Crossover 0.7		População 300 Crossover 0.5		População 300 Crossover 0.6		População 300 Crossover 0.9	
Casos	% de acertos	funções avaliadas	% de acertos	funções avaliadas	% de acertos	funções avaliadas	% de acertos	funções avaliadas
1	100%	35640	100%	12760	8/10	13650	9/10	17500
2	9/10	37333	7/10	14057	5/10	14580	5/10	18240
3	7/10	49028	9/10	28766	6/10	31600	5/10	32400
4	9/10	45600	5/10	25680	8/10	27075	9/10	29366
5	100%	46320	4/10	26850	2/10	27000	5/10	30180
6	9/10	43600	5/10	26340	4/10	26925	5/10	20640
7	100%	46680	8/10	25462	6/10	26950	4/10	30300
8	100%	46560	8/10	28162	7/10	27557	9/10	28466
9	100%	44640	5/10	29220	8/10	28462	6/10	27050

A taxa de *crossover* e tamanho da população tiveram seus valores modificados para realizar uma avaliação dos operadores e assim poder selecionar os mais adequados ao problema. O tempo de convergência variou conforme a média da quantidade de funções avaliadas em cada caso. Assim a população de 1200 da Tabela 3.5 foi a que mais exigiu esforço computacional, necessitando de um maior tempo para que houvesse a convergência. Pelos resultados obtidos pode-se notar que esta população apesar de ser 4 vezes maior que a dos outros casos, necessitou na maior parte dos testes menos que o dobro de tempo para atingir o resultado esperado, obtendo a maior taxa de acerto dos testes. A título de pesquisa, além da população de 1200, foi realizado estudos de populações menores, dentre estas a população de 300 indivíduos mostrou-se com melhor desempenho. Para este tamanho populacional foi variada então a taxa de *crossover*, obtendo assim os demais resultados da Tabela 3.5. A taxa de mutação foi mantida 0,01, pois os testes não mostraram necessidade da alteração deste valor.

Apesar de o sistema teste utilizado ser o mesmo de (WEN & HAN, 1995; WEN; CHANG; SRINIVASAN, 1997), não foi possível realizar uma comparação dos resultados, pois o modelo proposto visa não somente a localização do equipamento sob falta, mas também realizar uma avaliação quanto ao modo como a proteção atuou. Desta maneira, em nosso trabalho, os padrões criados que relacionam alarmes e eventos são diferentes, impossibilitando tal comparação.

3.7.2 GRNN Associado a PI

FRITZEN *et al*. (2010c) propôs um método de processamento de alarmes e diagnóstico de faltas, que explora os recursos das Redes Neurais Artificiais e um modelo de programação inteira binária.

As redes neurais foram utilizadas com o objetivo de inferir, com base nas sinalizações de disparo de relés, se a proteção do equipamento operou no modo seletivo ou não seletivo. Por meio desta estratégia consegue-se reduzir significativamente o número de mensagens que sinalizam a atuação de relés de proteção. A rede GRNN foi escolhida por ter um processo de treinamento rápido, que matematicamente ocorre em um único passo. Essa característica é ideal em aplicações envolvendo sistemas reais, pois facilita a inclusão de novos padrões de treinamento e a customização para outros equipamentos com lógicas de relés diferenciadas.

O modelo de otimização de programação inteira binária foi utilizado para representar a filosofia de proteção relacionando a saída das redes GRNN juntamente com os estados dos disjuntores. Por meio desse foi possível modelar o modo como as proteções dos diversos equipamentos de rede enxergam o defeito durante uma falta.

Os resultados mostram que o método proposto é promissor, pois é capaz de lidar de forma eficaz e precisa com as incertezas inerentes ao problema, além de tratar de modo natural a possibilidade de ocorrência de faltas simultâneas.

Desta maneira, a implementação de uma metodologia híbrida que envolveu a RNA GRNN associada a PI é apresentado em FRITZEN *et al.* (2010c) como mostrado a seguir.

Assim, o método proposto é composto por duas etapas. A primeira utiliza as RNAs GRNN. A segunda utiliza a programação inteira, que atua na lógica que relaciona os relés aos disjuntores. Para facilitar o entendimento do método de solução proposto, foi elaborado o fluxograma mostrado na Figura 3.5. Assim, os alarmes recebidos pelo sistema de aquisição de dados (SCADA) alimentam o sistema proposto com informações relativas ao disparo de relés

e estado de disjuntores. As informações de disparo dos relés são processados pela GRNN, e as informações dos disjuntores juntamente com a saída da GRNN são tratadas pelo modelo de programação inteira, que por sua vez fornecem o diagnóstico para a falta.

O processamento realizado pela GRNN diminui a quantidade de informações a serem consideradas pelo modelo de otimização, reduzindo muito seu esforço computacional .Desta maneira, a GRNN é treinada considerando apenas os equipamentos do sistema elétrico de forma isolada, ou seja, independentemente da topologia do sistema elétrico, o que traz benefícios, pois o treinamento independe da configuração do sistema elétrico. O modelo de programação inteira binária visa interpretar os alarmes recebidos e analisar a proteção do sistema elétrico como um todo.

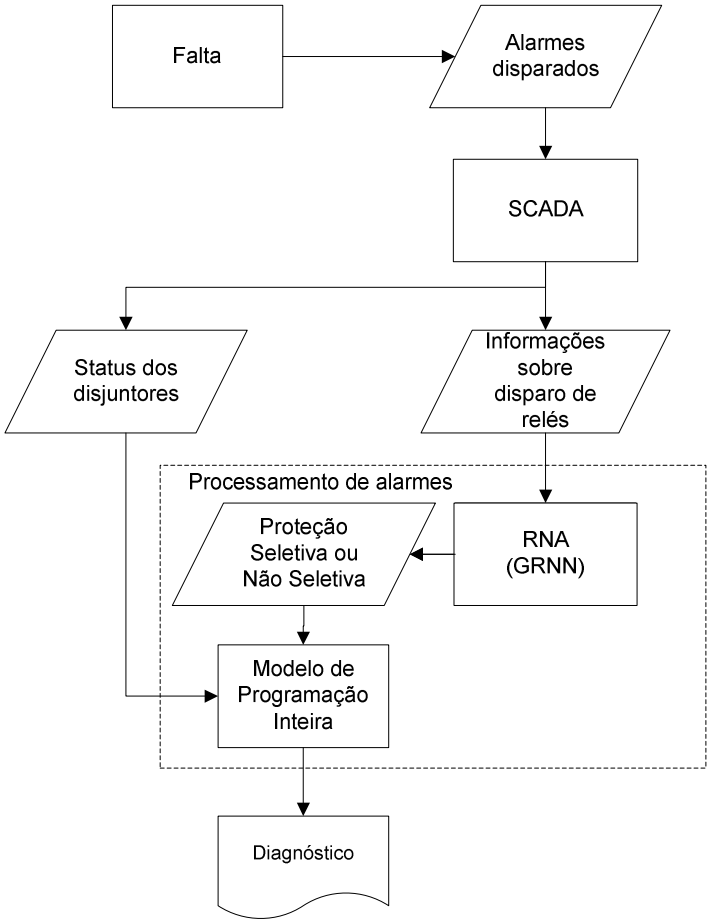


Figura 3.5 - Fluxograma do processamento de alarmes e diagnóstico de faltas pela associação da RNA e do modelo de programação inteira

3.7.2.1 Filosofia de proteção

A proteção de sistemas elétricos é realizada por meio de relés, que enviam um sinal de abertura aos disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo a integridade do restante do sistema.

A proteção primária, a proteção de retaguarda, e os relés auxiliares, compreendem os princípios fundamentais do sistema de proteção.

A proteção pode ser do tipo principal ou retaguarda. A primeira isola rapidamente o equipamento sob falta. Esse tipo de proteção é seletiva e de alta velocidade. A segunda tem a função de operar quando a proteção primária falhar ou quando a mesma encontrar-se em manutenção (assumindo o papel da proteção primária). É desejável que os relés de retaguarda sejam arranjados de modo a não falharem pelas mesmas razões que levam a proteção primária a falhar.

Na maioria das vezes as proteções de barra são projetadas de modo a minimizar o número de circuitos desligados, ou seja, somente os disjuntores associados à barra devem ser desligados.

As linhas de transmissão, dependendo da sua importância, são protegidas por relés de sobrecorente, de distância e teleproteção.

Quando ocorrer uma falha na abertura do disjuntor, de modo a diminuir o tempo de eliminação da falta, é utilizada a função falha de disjuntor. Que envia sinal de abertura para os disjuntores adjacentes ao que falhou.

Para exemplificar a lógica de proteção considere uma falta qualquer no transformador T5 da Figura 3.6. Os relés associados à Proteção Principal do Transformador T5 (PPT5) devem atuar enviando sinal de abertura aos disjuntores CB22 e CB24. Contudo, caso o disjuntor CB22 venha falhar, haverá o disparo da proteção de falha de disjuntor, a qual implicará na abertura dos disjuntores CB21, CB23.

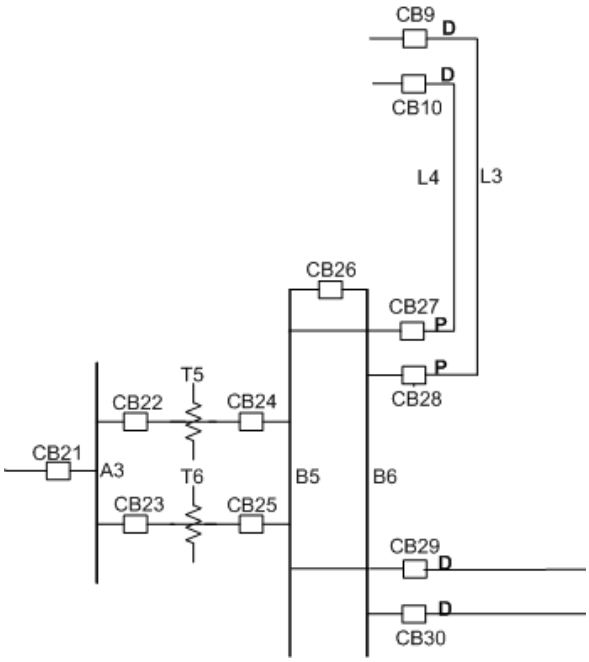


Figura 3.6 - Parte do Sistema Teste considerado

3.7.2.2 Redes GRNN

Foram treinadas 05 redes GRNN. Uma para cada equipamento (transformador, linha e barra) e duas redes GRNN destinadas à modelagem da teleproteção, que são utilizadas na rede GRNN da linha de transmissão.

As redes GRNN da teleproteção identificam se a teleproteção operou para uma falta dentro ou fora da linha, já que o esquema de bloqueio por portadora é passível de disparo indevido para faltas externas. Caso a teleproteção tenha operado para uma falta dentro da linha, é identificado o lado que a linha operou (D ou P). As saídas destas redes são incorporadas a rede GRNN das Linhas de Transmissão.

As saídas das redes foram codificadas da seguinte forma: nas Barras, Proteção Seletiva de Barras (PSB) e Proteção de Sob e/ou Sub Tensão na Barra (PSSTB); nas Linhas, Proteção Principal de Linha (PPL), Falta externa em direção ao lado D (FextLD) e Falta externa em direção ao lado P (FextLP); e nos Transformadores, Proteção Seletiva do Transformador (PST) e Proteção Não Seletiva do Transformador (PNST).

Cada neurônio de entrada representa um relé de proteção e cada neurônio de saída representa uma classificação sobre o tipo de proteção. A representação binária foi utilizada para representar os vetores de entrada. Assim, o valor binário "1" foi utilizado para indicar a

recepção de alarme associado, enquanto que o valor "0" foi utilizado para indicar a não recepção de alarme. A rede somente é ativada se algum alarme for recebido.

No treinamento das redes GRNN foram realizados os ajustes no valor do spread, através de verificação, e depois de vários testes chegou-se a um valor satisfatório para spread igual a 0,3 para a rede neural das barras; 0,37 para a rede neural do transformador; e 0,35 para a rede neural da linha de transmissão. Para as duas redes da teleproteção o valor utilizado foi de 0,5.

A Tabela 3.6 mostra alguns dos casos utilizados no treinamento da rede neural que representa os transformadores.

Tabela 3.6- Lógica de operação dos relés dos transformadores

Relés	1	2	3	...	16	17	18	19	20	...	32	33	34	...	96	97	...	112	113	...	126	127
87	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	0	0	...	0	0	...	1	1
63 T	0	0	0	...	0	0	0	0	1	...	0	0	0	...	0	0	...	0	0	...	1	1
63 VS	0	1	1	...	0	0	1	1	0	...	0	0	1	...	0	0	...	0	0	...	1	1
63 C	1	0	1	...	0	1	0	1	0	...	0	1	0	...	0	1	...	0	1	...	0	1
51 D	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0	0	...	1	1	...	1	1	...	1	1
51 P	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	1	1	1	...	1	1	...	1	1	...	1	1
51 Np	0	0	0	...	1	1	1	1	1	...	0	0	0	...	0	0	...	1	1	...	1	1
Tipo	A	A	A	...	B	A	A	A	A	...	B	A	A	...	B	A	...	B	A	...	A	A

A – Proteção Seletiva do Transformador (PST) B – Proteção Não Seletiva do Transformador (PNST)

A formulação matemática apresentada a seguir é fundamentada no modelo para o problema de recobrimento.

Considere:

Conjuntos

I = conjunto dos índices dos eventos

J= conjunto dos índices dos alarmes

E(j)= conjunto dos índices dos eventos associados ao alarme j

A(i) = conjunto dos índices dos alarmes associados ao evento i

Parâmetros

$$a_j = \begin{cases} 1 \; se \; o \; alarme \; j \; \text{é} \; acionado \\ 0 \; caso \; contrário \end{cases}$$

Variáveis

$$e_i = \begin{cases} 1 \; se \; o \; evento \; i \; for \; escolhido \\ 0 \; caso \; contrário \end{cases}$$

$$s_j = \begin{cases} 1 \; se \; o \; acionamento \; do \; alarme \; j \; é \; falso \\ 0 \; caso \; contrário \end{cases}$$

$$f_j = \begin{cases} 1 \; se \; acionamento \; do \; alarme \; j \; falhou \\ 0 \; caso \; contrário \end{cases}$$

Função Objetivo

$$\min w_1 \sum_{j \in J} s_j + w_2 \sum_{j \in J} f_j + w_3 \sum_{i \in I} e_i \qquad (3.5)$$

s.a.

$$s_j + \sum_{i \in E_{(j)}} e_i \geq a_j \qquad \forall j \in J \qquad (3.6)$$

$$e_i \leq a_j + f_j \qquad \forall i \in I \,, \forall j \in A_{(i)} \qquad (3.7)$$

$$e_i \in \{0,1\} \; \forall i \in I \qquad (3.8)$$

$$s_j, f_j \in \{0,1\} \; \forall j \in J \qquad (3.9)$$

Na função objetivo definida em (3.5), w1, w2 e w3 representam os pesos para alarmes falsos, alarmes falhos e eventos, respectivamente.

A restrição (3.6) determina que cada alarme deve estar associado a um evento ou é considerado falso. Os alarmes falhos são determinados pela restrição (3.7). Observe que um evento só pode ser considerado na solução se todos os alarmes associados a este forem considerados ativos ou falhos. As restrições (3.8) e (3.9) correspondem à condição de binariedade das variáveis.

As múltiplas soluções ótimas são facilmente identificadas, uma vez que, em geral, os resolvedores utilizam o método de branch andbound que pode ser adaptado a tal finalidade. Caso o pacote de programação linear inteira em uso não fornece essa opção, ainda é possível introduzir uma restrições iterativamente no modelo para cortar a última solução encontrada. Para tanto, basta considerar os n eventos que compõem uma dada solução que se deseja cortar e inserir a restrição da equação (3.10):

$$\sum_{i=1}^{n} e_i \leq n - 1 \qquad (3.10)$$

Para a criação dos padrões de eventos e alarmes foi considerado o mesmo sistema elétrico utilizado por WEN *et. al.* (1997), porém nos exemplos deste artigo foram utilizados apenas casos referentes a uma parte do sistema, que é ilustrada na Figura 3.6. O sistema elétrico utilizado é composto por 8 transformadores, 8 linhas de transmissão, 12 barras e 40 disjuntores. Alguns dos padrões utilizados no processamento estão na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Relação entre alarmes e eventos

Evento	Alarmes Relacionados	Equipamento	Diagnóstico
21	PST6, CB23, CB25	Trafo T6	O.K.
22	PNST6, CB23, CB25	Trafo T6	FALHA PST
24	PST6, CB23, CB24, CB26, CB27, CB29, PSSTBB5	Trafo T6	FALHA CB25
45	PPL4, CB10, CB27	Linha L4	O.K.
46	FextL4D, FextL4P, CB10, CB27	Linha L4	FALHA PPL
48	PPL4, CB10, CB24, CB25, CB26, CB29, PSSTBB5	Linha L4	FALHA CB27
75	PSBA3, CB21, CB22, CB23, PSSTBA3	Barra A3	O.K.
109	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29	Barra B5	O.K.
112	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB26, CB27, CB29, CB23, PNST6	Barra B5	Falha CB25
114	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB29, CB10, FextL4P	Barra B5	Falha CB27

A rede GRNN foi implementada no programa MATLAB®, e o modelo de programação inteira binária foi implementado e o resolvedor genérico utilizado foi o programa open source glpk versao 4.9. Os testes foram processados em um computador Intel Core 2 duo 2.1Ghz,4GB memória RAM.Em todos os testes o tempo de processamento pôde ser considerado desprezível, sendo estes próximos à 0 segundos.

Os pesos utilizados para as constantes que definem a importância relativa de cada um dos parâmetros do modelo de otimização, ou seja w1, w2, w3, foram 90, 30 e 10 respectivamente.

Alguns dos testes aplicados à rede neural do transformador estão demonstrados na Tabela 3.8.

O modelo de programação inteira foi validado com diversos casos, porém aqui serão apresentados apenas os 10 casos da Tabela 3.9.

Nos casos 1 e 2, o conjunto de alarmes recebidos é idêntico ao conjunto de alarmes de um evento contido na base de dados de dados do modelo.

Nos casos 3 a 5 houve a falha no recebimento de ao menos um alarme, apesar da falta destes alarmes o algoritmo identificou corretamente cada evento.

No caso 6, dois eventos distintos, com a falha no recebimento de um alarme, podem justificar o conjunto de alarmes recebidos.

Nos casos 7 e 8, três diferentes combinações de 2 eventos podem explicar igualmente os alarmes recebidos. Porém uma das soluções de cada exemplo é uma combinação indevida de eventos, pois representam a atuação correta da proteção ao mesmo tempo em que sinaliza a falha de um dos equipamentos de proteção. Portanto uma simples restrição no modelo, proíbe

a atuação simultânea de eventos que representem a atuação correta da proteção de um equipamento e a atuação da proteção secundária do mesmo.

O teste 9 pode ser corretamente justificado por 3 diferentes combinações de 3 eventos simultâneos.

No exemplo 10 apenas um evento não justifica completamente os alarmes, restando o alarme PSBA3 sem resposta. Apesar de na formulação ter sido utilizado o critério de que a probabilidade de um alarme recebido ter sido indevidamente disparado é pequena, este caso foi diagnosticado como contendo um alarme falso, pois conforme o evento 75 da Tabela 2,teriam que ter falhados muitos outros alarmes para que tivesse realmente ocorrido uma falta na barra B3 e disparado e efetivamente ter disparado o alarme PSBA3.

Tabela 3.8 - Testes aplicados à GRNN

Teste	Alarmes esperados	Diagnostico	Resposta da GRNN (PS/PNS)	Evento
1	51Np	NSP	0.0018 / 0.9977	16
2	63Vs, 63C,51Np	SP	1.000 / 0.000	19
3	63Vs, 51P	SP	0.9995 / 0.0005	34
4	51P, 51Np	NSP	0.0018 / 0.9982	48
5	63Vs, 63C,51D	SP	1.000 / 0.000	67
6	51D, 51Np	NSP	0.0018 / 0.9982	80

Tabela 3.9 - Testes aplicados ao modelo matemático

Teste	Alarmes Recebidos	Diagnóstico
1	FextL4D, FextL4P, CB10, CB27	E46
2	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29	E109
3	FextL4D, FextL4P, CB27	E46 f(CB10)
4	FextL4D, FextL4P	E46 f(CB10 e FextL4P)
5	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29	E109 f(CB27 e CB29)
6	CB23, CB25	E21 f(PST6) ou E22 f(PNST6)
7	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29, CB10	E45 e E109 f(PPL4) ou E48 e E109 f(PPL4) ou E109 e E114 f(FextL4P)
8	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29, PNST6	E22 e E109 f(CB23) ou E22 e E112 f(CB23) ou E109 e E112 f(CB23)
9	PST6, PSBB5, PSSTBB5, PPL4, CB10, CB23, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29	E21 e E46 e E109 ou E21 e E46 e E114 ou E24 e E46 e E109 ou E24 e E46 e E114
10	PSBB5, PSSTBB5, CB24, CB25, CB26, CB27, CB29, PSBA3	E109 s(PSBA3)

Neste trabalho foi proposto um método de processamento de alarmes e diagnóstico de faltas, que explora os recursos das Redes Neurais Artificiais e um modelo de programação inteira binária.

As redes neurais foram utilizadas com o objetivo de inferir, com base nas sinalizações de disparo de relés, se a proteção do equipamento operou no modo seletivo ou não seletivo. Por meio desta estratégia consegue-se reduzir significativamente o número de mensagens que sinalizam a atuação de relés de proteção. A rede GRNN foi escolhida por ter um processo de treinamento rápido, que matematicamente ocorre em um único passo. Essa característica é ideal em aplicações envolvendo sistemas reais, pois facilita a inclusão de novos padrões de treinamento e a customização para outros equipamentos com lógicas de relés diferenciadas.

O modelo de otimização de programação inteira binária foi utilizado para representar a filosofia de proteção relacionando a saída das redes GRNN juntamente com os estados dos disjuntores. Por meio desse foi possível modelar o modo como as proteções dos diversos equipamentos de rede enxergam o defeito durante uma falta.

3.7.3 HC Associado a PI

FRITZEN *et. al*. (2011); FRITZEN *et. al*. (2012) apresentam uma metodologia para resolver o problema de processamento de alarmes e estimação da seção em falta ao nível de sistema de controle por meio da integração de duas técnicas: a Heurística Construtiva (HC) e a Programação Inteira (PI). Estes artigos resultaram nas principais respostas que fundamentaram o trabalho aqui realizado. Assim, a metodologia, resultados e conclusões serão apresentados com mais detalhes nos capítulos que seguem.

3.8 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os fundamentos dos métodos investigados para a realização do processamento de alarmes e estimação da seção em falta. Levando em consideração estes métodos conseguiu-se determinar qual deles é o mais adequado para a solução do problema proposto no trabalho. A rede neural GRNN depende dos estados dos relés e disjuntores o que aumenta a quantidade de conexões da rede, e mesmo que sejam criados modelos específicos para linhas, transformadores e barras, há grande dificuldade de sua aplicação em sistemas elétricos reais devido a dificuldade de ajustes do *spread* quando da inclusão de novos padrões, pois estes ajustes influenciam na diretamente na performance da rede neural. A HC tem como característica principal a robustez, e utiliza padrões de comparação entre dados de vetores e matrizes para encontrar uma resposta.

A forma como cada um dos métodos converge a sua resposta é diferente, sendo o AG um método heurístico e a PIB um método determinístico. O AG é fundamentado em leis da evolução de espécies que dependem de operadores probabilísticos como mutação e seleção. A forma como estas taxas são empregadas dependem do tipo de operador utilizado, porém todos estes dependem de taxas probabilísticas, não havendo como garantir sua convergência ao ótimo global. As taxas de seleção, reprodução e mutação devem ser estudadas para cada aplicação diferente do AG, ou seja, uma vez selecionados valores para um problema, qualquer modificação deste pode tornar os valores estabelecidos ruins, necessitando novos ajustes nas taxas.

O modelo de programação inteira é um método matemático, modelado a partir de restrições que são impostas por inequações mudando o estado de variáveis binárias, realizando desta forma o processamento dos alarmes de uma forma determinística. Uma vez definidos os valores das constantes da função objetivo e dados os conjuntos de eventos e alarmes, não há necessidade de ajuste em parâmetros.

As diversas técnicas encontradas na literatura que diferem bastante uma da outra, porém, a principal etapa do diagnóstico é comum a todos, ou seja, o conhecimento sobre a operação do sistema elétrico a ser monitorado.

Capítulo 4

METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Considerações Gerais

Os operadores do sistema podem ser surpreendidos por um alto número de alarmes reportados em virtude da ocorrência de contingências em um grande sistema elétrico.

Diante desta situação, o operador deve procurar entre uma grande quantidade de mensagens, a causa do problema. Um período de tempo significativo tende a ser necessário neste processo, tempo este que pode ser crucial para prevenir uma deterioração da situação. Assim, um operador trabalhando sob *stress* e recebendo quantidades excessivas de dados pode ser levado a conclusões errôneas sobre a origem do problema.

O operador com base nas informações dos alarmes deve usar a sua experiência e decidir o que exatamente aconteceu com o sistema. Essa tarefa pode muitas vezes não ser trivial, pois existe a possibilidade de ocorrência de eventos múltiplos, falha ou operação indevida de relés, falha de disjuntores e falha em unidades remotas de aquisição de dados.

A utilização de ferramentas computacionais de apoio à tomada de decisão, fundamentados em métodos de inteligência computacional, tem se tornado imprescindível nos centros de operação e controle dos sistemas elétricos de potência para o rápido restabelecimento do mesmo ao seu estado normal de operação.

Para reduzir imprecisões na análise de alarmes disparados nas centrais de operação e controle de sistemas elétricos devem ser desenvolvidas ferramentas computacionais capazes de auxiliar o operador. Estas ferramentas devem ajudar o operador na tomada de decisão através da redução na quantidade de informações a serem processadas e analisadas, por meio do descarte de informações redundantes e irrelevantes, além de melhorar a forma e o conteúdo das mensagens apresentadas ao operador, bem como sugerir as ações corretivas a serem tomadas.

Soluções baseadas em inteligência computacional foram largamente propostas nos últimos anos. Porém, atualmente, com os avanços no desempenho de resolvedores genéricos para problemas de programação inteira, tornou-se viável utilizar formulações analíticas para solucionar o problema de processamento de alarmes. Esta tese propõe um

modelo matemático com variáveis binárias para resolução do problema de processamento de alarmes.

Para tal metodologia, o ajuste de parâmetros não é tão crítico como heurísticas e meta-heurísticas, o que torna fácil a sua aplicação numa grande gama de instâncias do problema em questão. Ainda, em casos em que o tempo computacional para provar a otimalidade seja proibitivo para os fins práticos desejados, pode-se truncar o processamento e obter uma solução quase-ótima.

Uma das abordagens utilizadas pelos sistemas automáticos para a estimação da seção em falta corresponde aos processadores inteligentes de alarmes, que fornecem aos operadores o suporte necessário na tarefa de interpretação dos múltiplos alarmes associados a uma falta no sistema e a identificação do equipamento com defeito.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia onde a Heurística Construtiva (HC) e a Programação Inteira (PI) se complementam de modo a resolver o problema. O caráter inovador deste trabalho está fundamentado numa ferramenta funcional que permite inclusão de novas informações e que tenha facilidade de se adaptar as mesmas. Desse modo, havendo a atualização do banco de dados por parte do usuário quando ocorrer um novo evento ainda não registrado, não há necessidade de retreinamento ou definições de parâmetros por parte da equipe de operadores

A Figura 4.1 mostra o esquema de um Sistema de Supervisão e Controle situando as etapas onde ocorre o processamento de alarmes e a estimação da seção em falta e suas respectivas interações entre a Interface Homem Máquina e o Sistema de Supervisório.

A ferramenta proposta é ativada assim que uma condição de operação anormal do sistema elétrico seja detectada por meio da sinalização de alarmes, associados a relés e disjuntores. A condição anormal é ocasionada por distúrbios que originaram a falta como por exemplo, curto-circuito monofásico, curto-circuito bifásico, curto-circuito bifásico-terra, curto-circuito trifásico. As informações provenientes da ativação da ferramenta são capturadas em uma "janela" temporal com intervalo de tempo de 30 segundos. Esta ferramenta é alimentada com toda a informação útil associada à ocorrência, de modo a caracterizar com maior precisão o evento. Para melhor compreensão do problema, o mesmo foi dividido em dois estágios: um de busca local em nível de equipamento e outro em nível de sistema. Estes passos podem ser vistos na Figuras 4.2 e Figura 4.3.

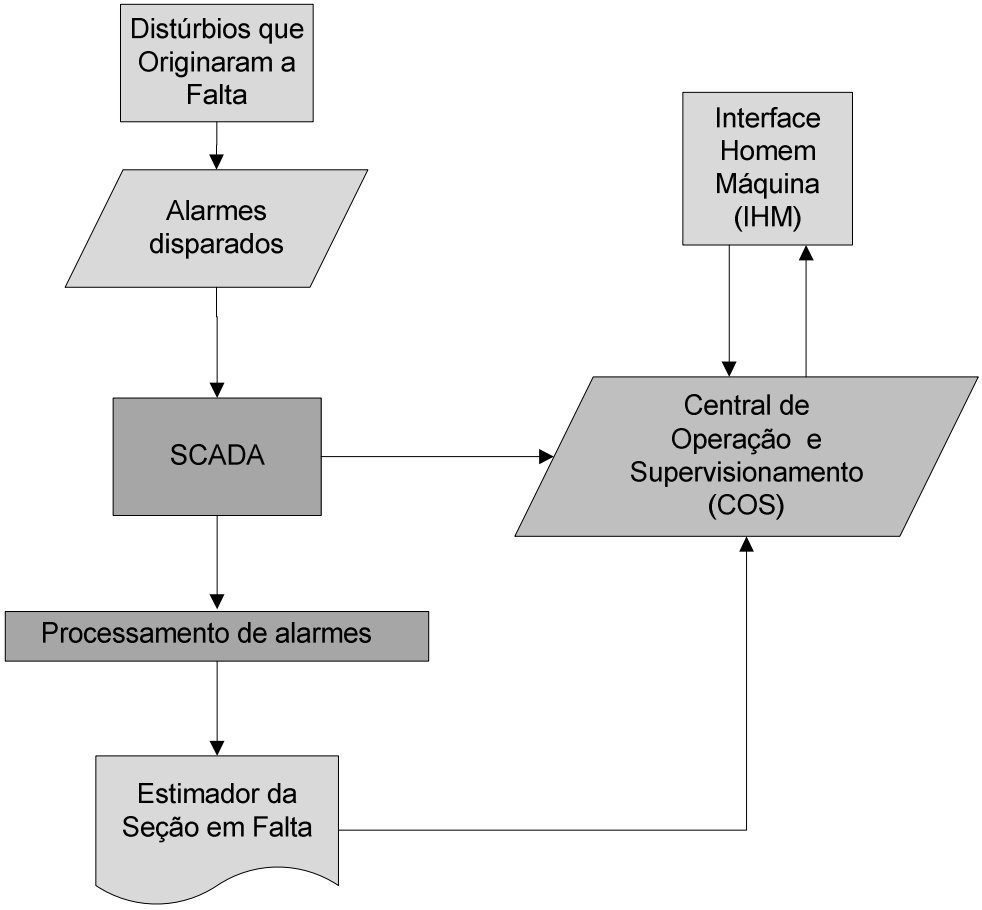


Figura 4.1 – Esquema da atuação do processador e estimador de faltas

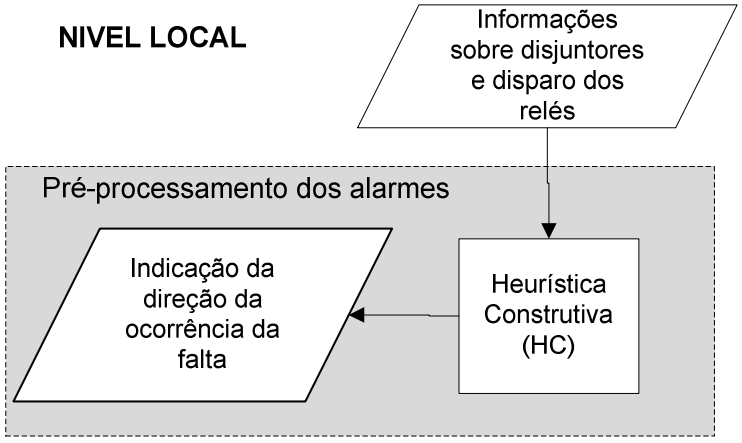


Figura 4.2 – Estágio em nível local do processador e estimador de faltas

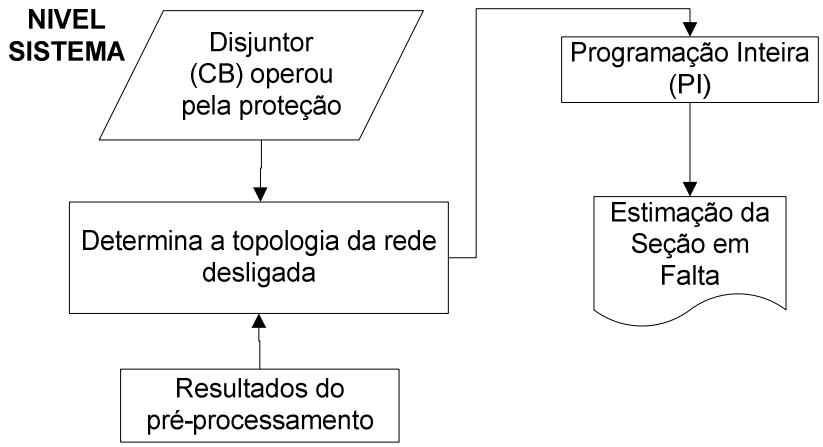


Figura 4.3 – Estágio em nível de sistema do processador e estimador de faltas

O problema de busca local realiza uma pré-processamento que é responsável por classificar a direção que ocorreu a falta que ocasionou o desligamento em nível de equipamento (transformador, linha de transmissão ou barra). Nesta etapa somente são processadas as informações provenientes dos relés associados a um determinado equipamento bem como as informações dos disjuntores associados a este mesmo equipamento. Por exemplo, de uma barra ou de uma linha de transmissão ou de um transformador. Para o diagnóstico em nível de equipamento, o método usado foi o da heurística construtiva, por não necessitar de ajustes de parâmetros.

O problema em nível de sistema recebe os resultados do pré-processamento que associada à lógica que relaciona os equipamentos aos disjuntores, juntamente com o conhecimento da rede desligada busca identificar os equipamentos em falta. Nesta etapa é necessário o uso de uma ferramenta computacional adaptada a problemas que envolvam explosão combinatorial. Para este fim, foi decidido explorar a programação linear inteira (PI), uma vez que não precisa definir os parâmetros e os resultados dos testes preliminares apontam para PI como uma boa ferramenta para a solução do problema.

Deste modo, a interpretação dos alarmes em nível de equipamento modela a lógica de proteção relacionada ao equipamento. Por outro lado, a análise em nível de sistema busca modelar a filosofia de proteção como um todo, relacionando a resposta do sistema de proteção utilizado em cada equipamento ao defeito. A análise em nível de sistema considera a topologia da rede para todos equipamentos que estão ligados ou ativos, portanto as mudanças topológicas da rede de energia são consideradas cada uma como sendo um sistema independente.

4.2 Fluxograma

De modo a facilitar o entendimento do método proposto foi esquematizado o fluxograma mostrado na Figura 4.4. Assim, os alarmes recebidos pelo sistema de aquisição de dados (SCADA) alimentam o sistema proposto com informações relativas ao disparo de relés e estado de disjuntores. As informações de disparo dos relés e dos disjuntores associados são processados pela HC, e as informações dos disjuntores juntamente com a saída da HC são tratadas pela PI, que por sua vez identificam o equipamento em falta.

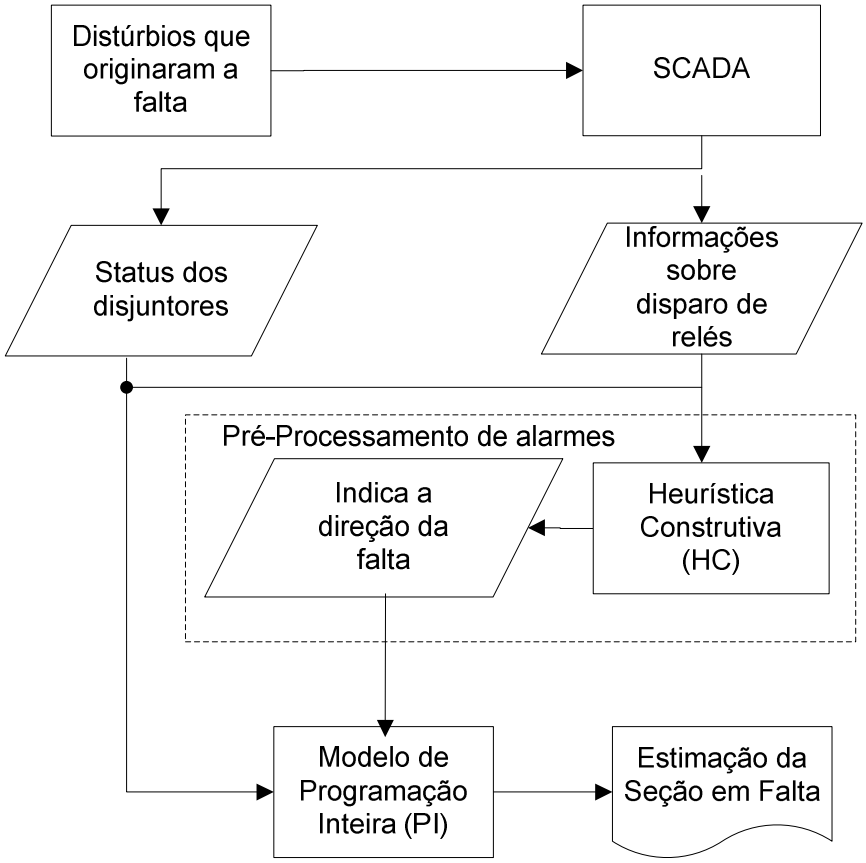


Figura 4.4 - Fluxograma do método proposto

4.3 Formulação do problema

A metodologia proposta é composta por três etapas: a primeira diz respeito ao sistema elétrico, mais precisamente a filosofia de proteção considerada; a segunda etapa consiste na modelagem da heurística construtiva; e a terceira etapa, na formulação da programação inteira.

4.3.1 Filosofia de proteção

A filosofia de proteção consiste em dividir-se o sistema elétrico em zonas supervisionadas por relés de modo a minimizar o número de componentes desligados por uma condição de falta. Para cada zona do sistema elétrico existe um esquema de proteção associado de maneira a atuar somente para faltas dentro de seu alcance de atuação.

O trabalho de ALMEIDA *et al.* (2005) define os esquemas de proteção como sendo o conjunto de relés e dispositivos de proteção, outros dispositivos afins, equipamentos de tele-proteção, circuitos de corrente alternada e corrente contínua, circuitos de comando e sinalização, disjuntores, etc. que associados têm por finalidade proteger componentes (linhas de transmissão, barramentos, transformadores e equipamentos) ou parte do sistema elétrico de potência quando em condições anormais, indesejáveis ou intolerantes.

Para o problema em questão, existem três esquemas de proteção: transformador, barra e linha de transmissão. A proteção principal e de retaguarda compreendem os princípios fundamentais do sistema de proteção.

A proteção principal é do tipo seletiva e de alta velocidade. 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). É desejável que os relés de retaguarda sejam arranjados de modo a não falharem pelas mesmas razões que levam a proteção primária a falhar.

Geralmente os transformadores são afetados pela ocorrência de curtos-circuitos entre espiras e fases com ou sem envolvimento da terra. Por isto é bastante comum proteger os transformadores de potência por meio da proteção diferencial (87) e relés detectores de gás Buchholz (63). A proteção de retaguarda é feita por meio de relés de sobrecorrente temporizados (51) e/ou fusíveis (CARDOSO Jr. 2003).

Na maioria das vezes as proteções de barra são projetadas de modo a minimizar o número de circuitos desligados, ou seja, somente os disjuntores associados à barra devem ser desligados (CARDOSO Jr. 2003).

As linhas de transmissão, dependendo da sua importância, são protegidas por relés de sobrecorrente, de distância e teleproteção (CARDOSO Jr. 2003).

A proteção primária tem a finalidade de isolar a seção em falta o mais rápido possível. Essa proteção é dita seletiva, pois retira de serviço apenas o elemento do sistema que apresentou algum tipo de defeito. A proteção de retaguarda tem a função de operar quando a principal falhar ou quando a mesma encontrar-se em manutenção (assumindo o papel da

proteção primária). É desejável que os ajustes dos relés para a proteção de retaguarda sejam arranjados de modo a não falharem pelas mesmas razões que levam a proteção primária a falhar.

As lógicas de proteção são modeladas com o auxílio da HC levando em consideração os estados de relés e dos disjuntores associados ao equipamento. As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostram os esquemas de proteção associados ao transformador, às barras e linhas de transmissão, respectivamente.

Os dispositivos associados aos esquemas de proteção mostrados nas Figuras 4.5; 4.6 e 4.7 seguem as padronizações estipuladpos pela ANSI (American National Standards Institute) e possuem as seguintes definições:

87 – relé de proteção diferencial;

63 T – relé de pressão de gás (Buchholz) do autotransformador;

63 VS – válvula de segurança (Buchholz);

63 C – relé de pressão de gás (Buchholz) do comutador sob carga;

51 D – relé de sobrecorrente de fase temporizado, do lado D;

51 Np – relé de sobrecorrente de neutro temporizado;

51 P - relé de sobrecorrente de fase temporizado, do lado P;

52 – disjuntor de corrente alternada;

27- relé de subtensão;

59 – relé de sobretensão;

86 – relé de bloqueio

86 BF -

21-1 – relé de distância, primeira zona;

21N-1 - relé de distância de neutro;

21-2 - relé de distância, segunda zona (temporizada);

21P - relé de distância de sobrealcance da proteção principal;

67NI – relé direcional de sobrecorrente de neutro (instantâneo);

67NT – relé direcional de sobrecorrente de neutro (temporizada);

67NP – relé direcional de sobrecorrente de neutro da proteção principal (partida);

67NP/G1 – relé direcional de sobrecorrente de neutro reversa para partida do carrier.

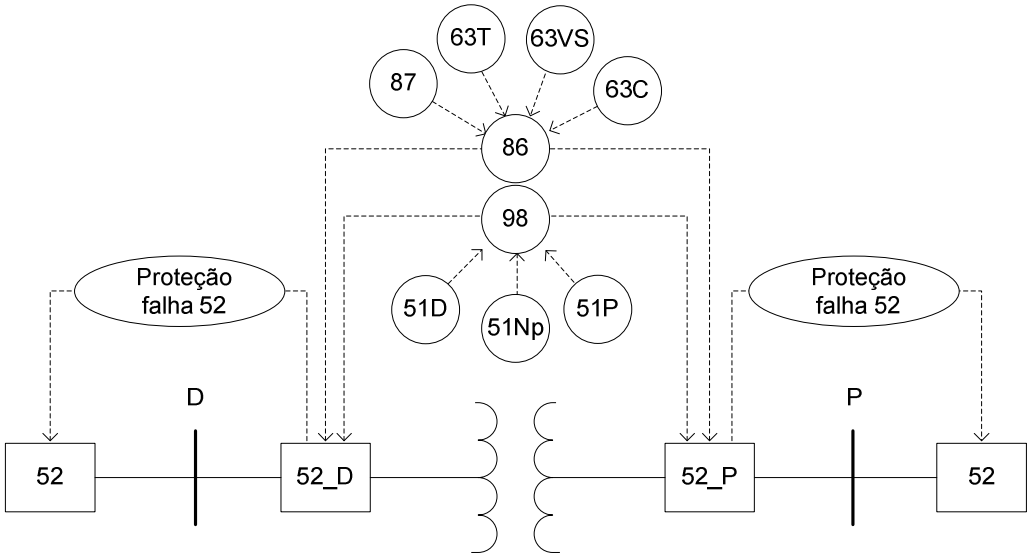


Figura 4.5 - Dispositivos de proteção associados ao Transformador

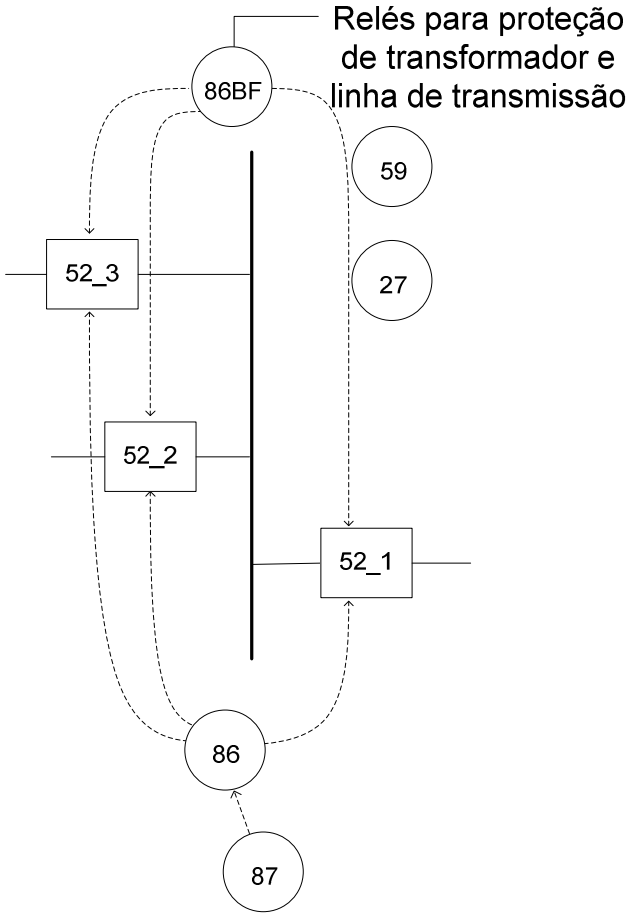


Figura 4.6 - Dispositivos de proteção associados às Barras

Figura 4.7 - Dispositivos de proteção associados às Linhas de Transmissão

Os transformadores são sujeitos ocorrência de curtos-circuitos entre espiras e fases com ou sem envolvimento da terra. A proteção principal de transformadores de potência é feita por meio da proteção diferencial (87) e relés detectores de gás Buchholz (63). Esses relés estão associados ao relé de bloqueio (86), o qual promove a abertura dos disjuntores (52). A proteção de retaguarda é feita por meio de relés de sobrecorrente temporizados (51) e também atua na falha da proteção principal da vizinhança, ex: barras e linhas.

As proteções de barra são projetadas de modo a minimizar o número de circuitos desligados, ou seja, somente os disjuntores associados à seção da barra com defeito que devem ser desligados. A proteção é feita com auxílio do relé diferencial (87) e de bloqueio (86). A abertura dos disjuntores da barra também poderá ser acionada via função falha de disjuntor.

As linhas de transmissão apresentam a maior variedade de filosofias de proteção, podendo estas serem protegidas por relés de sobrecorrente, de distância e/ou teleproteção.

Convém salientar que neste trabalho foi considerado, tanto na HC como na PI, uma simbologia alternativa para os disjuntores com sendo CB (*circuit breakers*) diferente do que recomenda a ANSI que considera a classificação numérica 52, por ser conveniente com vários artigos utilizados como referência neste trabalho.

4.3.2 Modelagem da Heurística Construtiva

A idéia principal da HC é fazer o pré-processamento de alarmes para cada equipamento do sistema e a partir dele obter uma classificação sobre o seu estado.

O método de diagnóstico é baseado no produto interno entre o vetor dos alarmes recebidos e a matriz contendo os padrões de eventos de determinado equipamento somado com produto interno entre a negação do alarme recebido e negação do padrão de eventos. O propósito dessa comparação é o de encontrar o evento que melhor justifica e explica o defeito.

Um exemplo simples é utilizado para ilustrar o processo da HC. Seja A = [1 1 1 0] o vetor alarme recebido e E = {$e1$, $e2$, $e3$}, a matriz com o padrão de eventos onde:

$e1$ = [1 1 0 0]
$e2$ = [1 0 1 0]
$e3$ = [0 1 0 1]

O resultado da HC é dado pela expressão (4.1) e é obtido pela soma dos produtos internos das equações (4.2) e (4.3).

$$HC = \frac{a + e}{\max\,(a + e)} \tag{4.1}$$

$$a = A * E \tag{4.2}$$

$$e = \tilde{A} * \tilde{E} \tag{4.3}$$

Assim, para exemplificar tem-se:

$$a = A * E = [1\ 1\ 1\ 0] * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [2\ 2\ 1]$$

$$e = \tilde{A} * \tilde{E} = [0\ 0\ 0\ 1] * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [1\ 0\ 0]$$

$$HC\,\frac{a+e}{\max\,(a+e)} = \frac{[2\ 2\ 1]+[1\ 0\ 0]}{3} = \frac{[3\ 2\ 1]}{3} = [1 \quad 0.67 \quad 0.33]$$

Esse resultado significa que o evento que melhor explica o alarme recebido é o evento $e1$, o qual possui o maior grau de certeza. A resposta final da HC é a classificação do tipo de falta associada ao evento selecionado como causa do defeito, nesse caso a classificação é $e1$.

Pensando num sistema de transmissão típico que contém os seguintes equipamentos: transformador de potência, linhas de transmissão e barras; foram projetadas 3 heurísticas, uma para cada equipamento. As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostram os padrões de eventos para HC.

O resultado da HC varia de acordo com o tipo de equipamento. Para transformadores e linhas de transmissão, os diagnósticos possíveis são: FALTA, NÃO FALTA, FALTA NO LADO D, FALTA NO LADO P. Essas duas últimas leituras remetem a direção da falta, a qual não está situada na vizinhança da seção analisada.

Os relés associados à proteção de barras não possuem capacidade de mostrar a direcionalidade da falta. Dessa maneira, a HC para barra irá diagnosticar apenas FALTA ou NÃO FALTA.

Tabela 4.1 - Lógica de operação dos relés e disjuntores associados ao transformador

Relés	Eventos																																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
87I(63TIVSIC)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
86	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51 D	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51 Np	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
51 P	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0
94	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
CB D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
CB P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
62X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
86BF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Tipo	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	FD	FD	FD	FD	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	FP	NF	NF	NF

F – Falta Interna; FD – Falta Externa no lado D; FP – Falta Externa no lado P; NF – Não Falta

Tabela 4.2 - Lógica de operação dos relés e disjuntores associados à barra

Relés	Eventos																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
87	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
86	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/59	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
CBs	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
86BF	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
Tipo	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	NF	NF	NF	NF	NF

F – Falta Interna; NF - Não Falta

Tabela 4.3 - Lógica de operação dos relés e disjuntores associados à linha de transmissão

Relés	Eventos																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
D_21-1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_21-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D_21-2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
D_21-2T	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P_21-2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P_21-2T	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D_21-3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
D_21-3T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
P_21-3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P_21-3T	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB_D	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
CB_P	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Tipo	FD	FD	FD	FD	FD	F	F	F	F	F	FP	FP	FP	FP	FP	NF	NF	NF

F-Falta; FD-Falta Externa no lado D; FP-Falta Externa no lado P; NF-Não Falta

4.3.3 Formulação da Programação Inteira

Nesta etapa a filosofia de proteção é modelada de modo a inserir a configuração e teste da programação inteira. Deste modo, a função da PI é analisar a lógica de proteção do sistema de modo integrado. Para tal, são consideradas as saídas da HC e os estados dos disjuntores (CB – *circuit breakers*).

O que reflete as exigências para resolver o problema de estimação da seção em falta é fundamentado na teoria da parcimônia, ou seja, a hipótese mais simples capaz de explicar os alarmes recebidos deve ser a solução. Desta forma utiliza-se um critério minimizador, cuja função objetivo pode ser formulada por um modelo matemático baseado em um modelo para o problema de recobrimento, conforme apresentado a seguir:

Modelo

$$Min\ W1 \sum_{j \in J} s_j + W2 \sum_{j \in J} f_j + W3 \sum_{i \in I} e_i \qquad (4.4)$$

Sujeito a

$$s_j + \sum_{i \in E(j)} e_i \geq a_j \qquad \forall_j \in J \qquad (4.5)$$

$$e_i \leq a_j + f_j \qquad \forall_i \in I, \forall_j \in A_{(i)} \qquad (4.6)$$

$$e_i \in \{0,1\} \qquad \forall_i \in I \qquad (4.7)$$

$$s_j,\ f_j \in \{0,1\} \qquad \forall_j \in J \qquad (4.8)$$

Conjuntos

I = conjunto dos índices dos eventos

J=conjunto dos índices dos alarmes

E(j)= conjunto dos índices dos eventos associados ao alarme j

A(i) = conjunto dos índices dos alarmes associados ao evento i

Parâmetros

$$a_j = \begin{cases} 1\ se\ o\ alarme\ j\ \text{é}\ acionado \\ 0\ caso\ contrário \end{cases}$$

Variáveis

$$e_i = \begin{cases} 1\ se\ o\ evento\ i\ for\ escolhido \\ 0\ caso\ contrário \end{cases}$$

$$s_j = \begin{cases} 1\ se\ o\ acionamento\ do\ alarme\ j\ \text{é}\ falso \\ 0\ caso\ contrário \end{cases}$$

$$f_j = \begin{cases} 1\ se\ acionamento\ do\ alarme\ j\ falhou \\ 0\ caso\ contrário \end{cases}$$

A função objetivo é definida em (4.4), onde *W*1, *W*2 e *W*3 representam os pesos para alarmes falsos, alarmes falhos e eventos, respectivamente. Esta função objetivo é semelhante à proposta por WEN e HAN, (1995). Neste trabalho, o usuário pode definir pesos específicos de acordo com sua experiência e histórico das faltas. Isto torna possível que resultados subsequentes sejam melhores e mais refinados.

A restrição (4.5) determina que cada alarme deve estar associado a um evento ou é considerado falso. Os alarmes falhos são determinados pela restrição (4.6). Observe que um

evento só pode ser considerado na solução se todos os alarmes associados a este forem considerados ativos ou falhos. As restrições (4.7) e (4.8) correspondem à condição de binária das variáveis.

Para um melhor entendimento, é apresentado um exemplo com quatro eventos e três alarmes. Os eventos e seus respectivos alarmes são representados pela matriz M, conforme segue:

$$M = \begin{array}{c} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} a_1 & a_2 & a_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Para esta configuração o modelo assume a forma:

$$Min\, W_1(s_1 + s_2 + s_3) + W_2(f_1 + f_2 + f_3) + W_3(e_1 + e_2 + e_3 + e_4)$$

Sujeito a

$$s_1 + e_1 + e_3 \geq a_1$$

$$s_2 + e_2 + e_3 \geq a_2$$

$$s_3 + e_4 \geq a_3$$

$$e_1 \leq a_1 + f_1$$

$$e_2 \leq a_2 + f_2$$

$$e_3 \leq a_1 + f_1$$

$$e_3 \leq a_2 + f_2$$

$$e_4 \leq a_3 + f_3$$

$$e_1, e_1, e_3, e_4 \in \{0,1\}$$

$$s_1, s_2, s_3, f_1, f_2, f_3 \in \{0,1\}$$

Se todos os alarmes são recebidos, ou seja, $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ e $W_1 >> W_2 >> W_3 > 0$, uma solução ótima possível é dada por $e_3 = e_4 = 1$. Observe que outra solução ótima é dada por $e_1 = e_2 = e_4 = 1$.

As múltiplas soluções ótimas são facilmente identificadas, uma vez que, em geral, os resolvedores utilizam o método de *branch and bound* que pode ser adaptado para tal finalidade. Caso o pacote de programação linear inteira em uso não forneça essa opção, é

possível introduzir uma restrição iterativamente no modelo para eliminar a última solução encontrada. Para tanto, basta considerar os *n* eventos que compõem uma dada solução que se deseja eliminar e inserir a restrição abaixo:

$$\sum_{i=1}^{n} e_1 \leq n - 1 \qquad (4.9)$$

$$e_3 + e_4 \leq 1 \qquad (4.10)$$

No exemplo, basta incluir a restrição (4.10) para eliminar a primeira solução, e fazer o modelo encontrar a próxima solução com menor valor de função objetivo possível. Desta forma, se a nova solução possui o mesmo valor de função objetivo, esta deve ser considerada uma resposta tão boa quanto à anterior. Este processo pode ser realizado até que todas as soluções ótimas sejam encontradas.

A identificação de alarmes falsos e falhos pelo modelo é discutida a seguir.

Assumindo agora o recebimento dos alarmes a_2 e a_3, e avaliando como a possível causa dos disparos o evento e_3, teríamos as seguintes restrições para avaliação dos alarmes falhos:

$$s_1 + 0 + 1 \geq 0$$

$$s_2 + 0 + 1 \geq 1$$

$$s_3 + 0 \geq 1$$

É possível ver que se considerado como resposta o evento e_3 tem-se na primeira restrição $s_1+1\geq0$, como a igualdade já é verdadeira não há necessidade de mudança na variável s_1. Na segunda restrição $s_2+1\geq1$, também como a igualdade está correta, a variável s_2 mantêm-se em 0. Já na terceira restrição tem-se $s_3+0\geq1$, assim a variável s_3 assume o valor 1, para que a igualdade seja mantida, tornando $1\geq1$. Desta forma se o evento e_3 for escolhido como única resposta para os alarmes recebidos o alarme a_3 passa a ser considerado falso.

O segundo grupo de restrições avalia quais alarmes são falhos, assim para o evento e_3, somente, tem-se:

$$0 \leq 0 + f_1$$

$$0 \leq 1 + f_2$$

$$1 \leq 0 + f_1$$

$$1 \leq 1 + f_2$$

$$0 \leq 1 + f_3$$

Analisando as restrições é possível notar que todas as igualdades estão corretas, com exceção da terceira na qual $1 \leq 0 + f_1$ necessita mudança de valor da variável f_1 para que a igualdade seja mantida, assim f_1 deve assumir o valor 1, tornando a igualdade $1 \leq 0+1$ verdadeira. Desta forma, se o evento e_3 for escolhido como única resposta aos alarmes recebidos a variável s_1 recebe o valor 1, diagnosticando o alarme a_1 como falho. Obviamente estas soluções não são ótimas, mas exemplificam perfeitamente como alarmes falhos e falsos são considerados pelo modelo.

Para a análise da seção em falta são utilizadas as respostas provindas da HC de cada um dos equipamentos do sistema elétrico juntamente com os sinais de abertura dos disjuntores. Assim a vizinhança, se capaz, deve indicar se detectou uma falta na direção do equipamento em falta. Na Figura 4.8 considerando uma falta no ponto "k" a análise dos relés de proteção da linha L2 sinalizariam a abertura dos disjuntores CB3 e CB4. Além disto, através do estudo das sinalizações dos relés dos equipamentos vizinhos à falta, pode-se ter uma confirmação da direção da falta, assim as linhas L1, L3 e L4 são capazes de fornecer a direção de L2 como em falta. A proteção das barras apesar não ser capazes de indicar a direção da falta, pode contribuir com a análise final da seção em falta confirmando que a barra em questão não esta em falta.

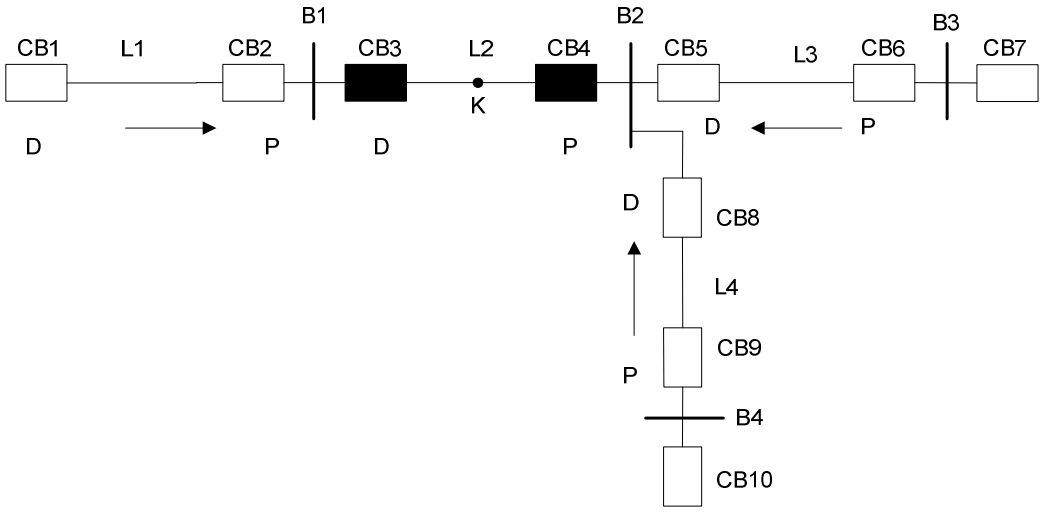


Figura 4.8 - Exemplo de falta no ponto k da Linha de Transmissão L2

O conjunto de padrões que definiriam uma falta em "k" na linha L2 com abertura correta de todos os disjuntores é: L1FP, L2F, L3FD, L4FD, CB3, CB4, B1NF, B2NF, B3NF e B4NF.

Onde,

L1FP indica que ocorreu uma falta externa à linha de transmissão L1 apontando para a direção P;

L2F indica que ocorreu uma falta interna à linha de transmissão L2;

L3FD indica que ocorreu uma falta externa à linha de transmissão L3 apontando para a direção D;

L4FD indica que ocorreu uma falta externa à linha de transmissão L4 apontando para a direção D;

CB3 indica que ocorreu a abertura do disjuntor CB3;

CB4 indica que ocorreu a abertura do disjuntor CB4;

B1NF indica que não ocorreu uma falta interna na barra B1;

B2NF indica que não ocorreu uma falta interna na barra B2;

B3NF indica que não ocorreu uma falta interna na barra B3;

B4NF indica que não ocorreu uma falta interna na barra B4;

4.3.4 Ferramentas computacionais utilizadas

O problema foi formulado em duas etapas utilizado-se as ferramentas computacionais Matlab® para realizar o pré-processamento da HC e a ferramenta computacional de acesso livre da companhia IBM denominado de ILOG CPLEX® ou simplesmente CEPLEX, para analisar a lógica de proteção do sistema e estimar a seção em falta. A ferramenta Matlab® ém amplamente difundida na engenharia não cabendo aqui maiores explicações, no entanto o mesmo não ocorre com a ferramenta CPLEX®, por isto segue uma breve explicação para esta ferramenta.

O CPLEX® é uma ferramenta para a solução de problemas de otimização linear, comumente referido como problemas de programação linear (PL), da seguinte forma:

Maximizar (ou Minimizar) $c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_nx_n$

sujeito a: $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1n}x_n \sim b_1$

$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + ... + a_{2n}x_n \sim b_2$

...

am1x1 + am2x2 +...+ amnxn ~ bm

parâmetros $l_1 \leq x_1 \leq u_1$

...

$ln \leq xn \leq un$

onde ~ pode ser $\leq$, $\geq$, ou =, e os limites superiores u_i e inferiores l_i podem ser qualquer número real, sendo para o infinito positivo ou infinito negativo.

Os elementos de dados que pode-se fornecer como entrada para este PL são:

Coeficientes da Função Objetiva $c_1, c_2, \ldots, c_n$

Coeficientes de Restrição (CR) $a_{11}, a_{21}, \ldots, a_{n1}$

...

$a_{m1}, a_{m2}, \ldots, a_{mn}$

CR (para o lado direito) $b_1, b_2, \ldots, b_m$

limites superiores e inferiores $u_1, u_2, \ldots, u_n$ e $l_1, l_2, \ldots, l_n$

A solução ideal que o CPLEX® calcula e retorna é dado pelas variáveis: $x_1, x_2, \ldots, x_n$

O CPLEX também pode resolver várias extensões para PL:

• Problemas de fluxo em redes, é um caso especial de PL que o CPLEX® pode resolver muito rápido, explorando a estrutura do problema.

• Problemas de Programação Quadrática (PQ), onde a função objetivo da PL é expandida para incluir termos quadráticos.

• Problemas de Programação Inteira Mista (PIM), onde toda ou qualquer variável da PL ou PQ são restringidas a adquirir valores inteiros na solução ótima e onde PIM é estendida incluindo conjuntos especiais ordenados e variáveis semi-contínuas.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia de solução proposta, o fluxograma do método, a formulação do problema tanto para a Heurística Construtiva quanto para a modelagem matemática da Programação Inteira.

A escolha por uma técnica hibrida da associação entre a Heurística Construtiva e a Programação Inteira, é motivada principalmente pela facilidade de implementação e velocidade de processamento da HC; possibilidade de obtenção de múltiplas soluções ótimas por parte da programação inteira, facilidade de interpretar e gerar resultados especialmente

adequados para situações complexas onde existe o mau-funcionamento de relés de proteção e/ou disjuntores. A programação inteira pode ser utilizada para representar a filosofia de proteção como um todo relacionando a saída das HC com a topologia da rede desligada. Esta estratégia favorece o desenvolvimento de um modelo que representa o modo como as proteções dos diversos equipamentos de rede enxergam o defeito durante uma falta.

É importante observar que o modelo de programação inteira, não necessita de ajustes. Assim, foi necessário somente apresentar os conjuntos *I, J, E(j)*e*A(i)*, os quais representam a relação entre os eventos e alarmes esperados no universo da aplicação.Outra característica importante é o fato do modelo ser determinístico, isto é, os resultados encontrados sempre são os mesmos para o mesmo conjunto de alarmes recebidos, diferentemente dos modelos heurísticos, que tendem a ter problemas com convergência ao ótimo global, o qual não tem a convergência garantida. Ou seja, os modelos heurísticos podem atingir resultados diferentes para os mesmos conjuntos de alarmes devido a problema com mínimos locais e ajuste de parâmetros.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Sistema Teste

O sistema teste utilizado foi o mesmo usado por WEN & HAN (1995); WEN & CHANG (1997). A HC foi implementada no Matlab® e as soluções da PI foram obtidas no CPLEX 12.1®. O sistema é composto de 8 transformadores de potência, 12 barras, 8 linhas de transmissão e 40 disjuntores, conforme ilustrado na Figura 5.1.

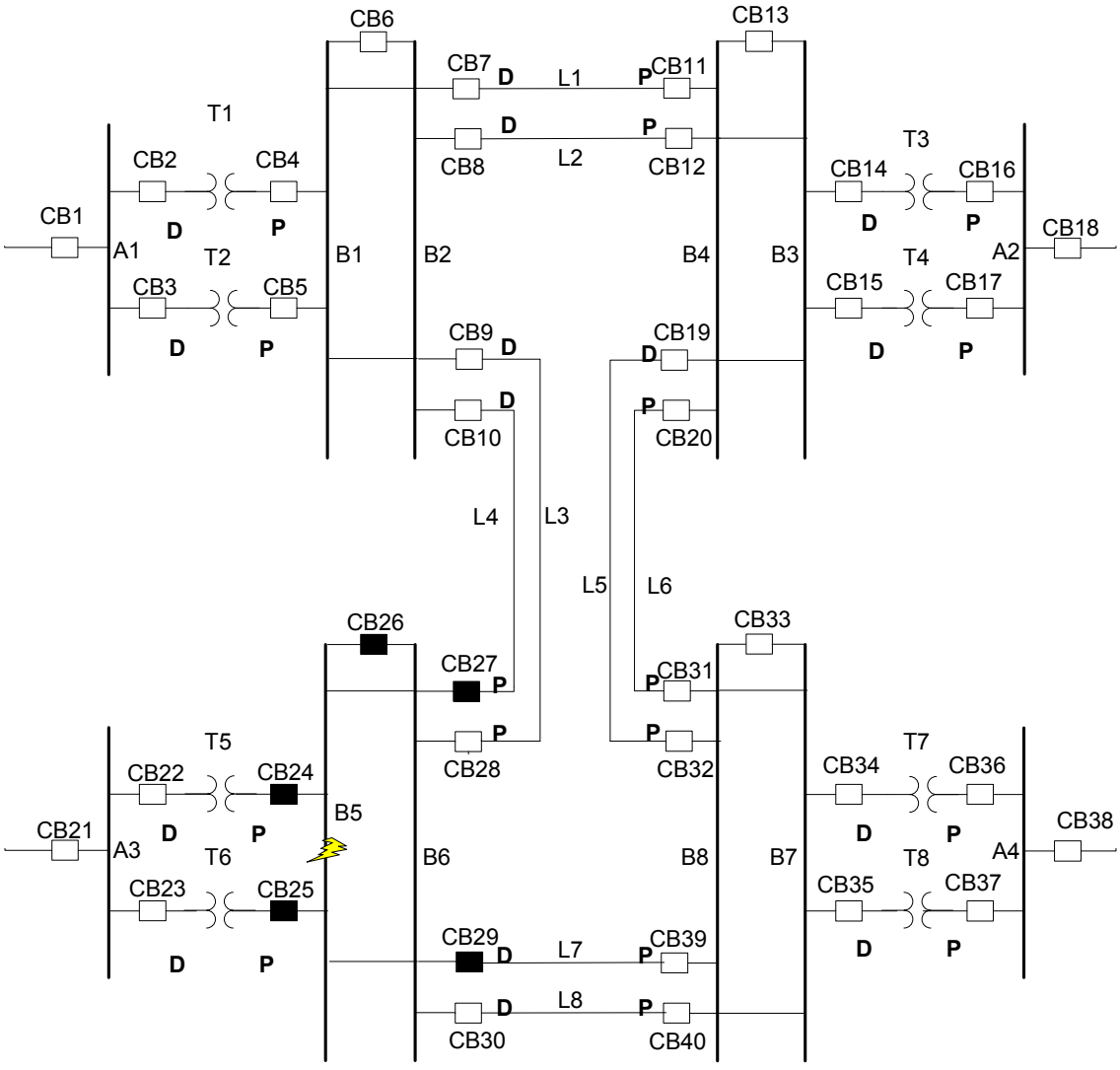


Figura 5.1- Sistema teste utilizado

5.2 Construção dos padrões

Conforme descrito no Capítulo 2, na seção 2.3, cada evento possui um conjunto característico de alarmes relacionados. Desta forma foram montados padrões para cada possível evento do sistema teste considerado. Como há a possibilidade de falhas nos equipamentos de proteção, os padrões incluem a atuação correta de todos os equipamentos e também padrões onde há a falha de atuação de um dos equipamentos envolvidos na proteção do mesmo. O total de padrões construídos para o sistema foram 104 eventos e 128 sinalizações (alarmes mais respostas da HC) (Apêndice A).

Os conjuntos de padrões foram organizados em forma de tabela, semelhante à Tabela 5.1, que demonstra os padrões criados para cada um dos equipamentos. Esta Tabela 5.1 define os conjuntos de padrões para o transformador de potência T1, para a linha de transmissão L1 e barras A1 e B1. Os padrões representam a relação entre alarmes e eventos, incluindo o desempenho correto de todos os equipamentos de proteção e de falha de disjuntor associado a cada equipamento a ser protegido. Caso mais do que um disjuntor venha a falhar, é esperado que a PI seja capaz de identificar dois eventos distintos e combiná-los.

Os alarmes considerados para a análise em nível de sistema seguem a seguinte classificação: disjuntores (CB) e repostas provenientes da heurística construtiva para cada equipamento.

A utilização de padrões com a falha de um equipamento é necessária, pois permite um diagnóstico sobre a atuação da proteção no momento da falta. Porém caso mais de um equipamento de proteção venha a falhar, caberá à PI selecionar os 2 eventos que indiquem a falha de cada um dos equipamentos individualmente. Por exemplo, se para uma falta na Linha 1 houvesse a falha da Proteção Principal da Linha 1 e também falha na abertura do disjuntor 7, o processador de alarmes deveria indicar estes dois eventos como diagnóstico do ocorrido no sistema. Cabendo ao operador analisar a resposta e ver que ambos os eventos se tratam de um mesmo equipamento, porém com a falha separada dos dois equipamentos de proteção.

Tabela 5.1 - Relação entre eventos e alarmes

Equipamento	Diagnóstico	Padrões Esperados
Trafo T1	O.K.	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB2	CB1, CB3, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB4	CB2, CB5, CB6, CB7, CB9, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
Linha L1	O.K.	CB7, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB7	CB4, CB5, CB6, CB9, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB11	CB7, CB13, CB20, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
Barra A1	O.K.	CB1, CB2, CB3, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB1	CB2, CB3, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB2	CB1, CB3, CB4, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB3	CB1,CB2, CB5, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
Barra B1	O.K.	CB4, CB5, CB6, CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB4	CB2, CB5, CB6, CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB5	CB3, CB4, CB6, CB7,CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB6	CB4, CB5, CB7, CB8, CB9, CB10, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP,T3NF, T4NF, T5NF,T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB7	CB4, CB5, CB6, CB9, CB11, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF
	FALHA CB9	CB4, CB5, CB6, CB7, CB28, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF

Para exemplificar a lógica de proteção considere uma falta interna no transformador T1 da Figura 5.1. Algum dos relés associados à Proteção Principal do Transformador T1 (87 ou 63) deverá atuar acionando o relé de bloqueio (86) que por sua vez promove a abertura dos disjuntores CB2 e CB4. Contudo, caso o disjuntor CB2 venha falhar, haverá o disparo da proteção de falha de disjuntor, a qual implicará na abertura dos disjuntores CB1, CB2 e CB3.

Para ilustrar melhor como o método encontra uma solução, é apresentado um exemplo passo à passo (Apêndice B), onde é considerado um curto-circuito na barra 5 com falha no disjuntor CB29, destacando como as soluções da HC e da PI são encontradas.

5.3 Resultados da HC

Para a simulação do algoritmo de pré-processamento HC foram considerados três cenários de testes para cada equipamento: conjunto de alarmes recebidos operando corretamente, conjunto com alarmes falsos (operação indevida) e conjunto com alarmes falhos (alarmes que deixaram de operar por algum motivo).

Exaustivos testes foram feitos para verificar a confiabilidade do método empregado. Como era de se esperar, quando o alarme é recebido em sua integridade, ou seja, sem falhas, o evento associado a ele é identificado e consequentemente a saída é certa e única.

Quando são recebidos alarmes falsos, o rendimento da HC cai razoavelmente no sentido de entregar algumas respostas duvidosas. O pior resultado foi a classificação de falta envolvendo o transformador. A porcentagem de acertos foi na ordem de 90% e o restante ficando em dúvida entre duas possibilidades.

Considerando alarmes falhos, o desempenho da HC também foi satisfatório, uma vez que a resposta única foi encontrada em quase totalidade dos testes. É importante salientar que o desempenho da HC para alarmes falhos pode cair bastante se a implementação da HC possuir pesos de acordo com o tipo de alarme. O método aqui empregado considerada pesos iguais para a identificação tanto dos alarmes falsos quanto dos alarmes falhos.

A Tabela 5.2 mostra alguns dos resultados obtidos na HC. Para tentar demonstrar a robustez da HC foram considerados defeitos do tipo: falha de operação do relé de bloqueio, falha do disjuntor, operação incorreta do relé contra falha do disjuntor, bem como alarmes corretos e com múltiplas falhas. As classificações das faltas pela HC foram, nesses casos, certas e únicas.

A Tabela 5.3 também mostra alguns dos resultados obtidos na HC, porém com dúvida entre duas classificações de faltas que correspondem aos 10 % dos resultados.

Como se pode inferir, a HC não depende do sistema elétrico em sua totalidade, mas sim do tipo de equipamento a ser analisado, uma vez o diagnóstico é feito de forma isolada e independente da vizinhança. Devido a isto, o tempo de processamento da HC é praticamente instantâneo ocorrendo em menos de 0,01 segundos.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos na Heurística Construtiva (HC) para os casos certos e únicos

Equipamento	Casos	Alarmes recebidos	Eventos que explicam os Alarmes Recebidos	Diagnóstico
Transformador	1	87, 86, 51D, 94, CB_D, CB_P	Falta interna	Falta (F)
Transformador	2	87, 51Np, 94, CB_D, CB_P	Falta interna (Falha do 86)	Falta (F)
Transformador	3	51D, 94, CB_D, 62X, 86BF	Falta externa no lado D (Falha do disjuntor)	Ext. D (FD)
Transformador	4	51Np, 51P, CB_D, CB_P	Falta externa no lado P	Ext. P (FP)
Transformador	5	86, CB_P	Não Falta (operação indevida 86)	Não Falta (NF)
Barra	6	87, 86, CBs	Falta	Falta (F)
Barra	7	87, 86, 86BF	Falta (Falha no disjuntor)	Falta (F)
Barra	8	86, 59, CBs, 86BF	Falta (alarme falso)	Falta (F)
Barra	9	59	Não Falta	Não Falta (NF)
Linha de transmissão	10	21-1D, 21-1P, 21-2D, 21-3D, 21-2P, 21-3P, CB_D, CB_P	Falta na LT	Falta (F)
Linha de transmissão	11	21-1P,21-2D, 21-3D, 21-3TD, 21-2P, 21-3P, CB_D, CB_P	Falta na LT (Falha da zona 2 D)	Falta (F)
Linha de transmissão	12	21-2P, 21-3D, 21-3P, 21-3TP, CB_P	Falta externa no lado D (alarme falso)	Ext. D (FD)
Linha de transmissão	13	21-2D, 21-3D, CB_D	Falta externa no lado P (alarme falho)	Ext. P (FP)
Linha de transmissão	14	21-3P, CB_P	Não Falta (alarme falso)	Não Falta (NF)

Tabela 5.3 – Resultados obtidos na Heurística Construtiva (HC) com dúvida em dois diagnósticos

Equipamento	Casos	Alarmes recebidos	Eventos que explicam os Alarmes Recebidos	Diagnóstico
Transformador	1	51D, 51Np, 94, CB_D, 62, 86BF	Falta externa no lado D + Falta externa no lado P (alarme falso)	FD ou FP
Transformador	2	86, 51D, 94, CB_D, CB_P	Falta interna + Falta externa no lado D (alarme falho)	Falta (F) ou FD
Barra	3	59, CBs	Falta interna + Não Falta (alarme falso)	Falta (F) ou Não Falta (NF)
Barra	4	87, 86, 59	Falta interna + Não Falta (alarme falso)	Falta (F) ou Não Falta (NF)
Linha de transmissão	5	21-3D, CB_D	Falta externa no lado P + Não Falta (alarme falso)	FP ou Não Falta (NF)
Linha de transmissão	6	21-3P, CB_P	Falta externa no lado D + Não Falta (alarme falho)	FD ou Não Falta (NF)

5.4 Resultados da PI

Os coeficientes positivos de pesos, que definem a importância de cada termo foram estabelecidos como 9, 3 e 1 para alarmes falsos, alarmes falhos e número de eventos, respectivamente. A menor função objetivo encontrada para um conjunto de alarmes recebidos deve ser 1, onde todos os alarmes recebidos são corretamente justificados por um evento. Nesta situação não há alarmes falsos nem falhos e um evento é capaz de cobrir todos os alarmes recebidos. O valor de 9 para os alarmes falsos foi escolhido, pois é suficientemente alto para evitar que sejam considerados alarmes falsos com frequência nos conjuntos de alarmes recebidos, porém possíveis de serem considerados.

Neste trabalho, para melhor apresentação dos resultados encontrados pela PI, foram realizados testes com características distintas e divididos em 4 (quatro) tabelas, a saber, Tabela 5.4, Tabela 5.5, Tabela 5.6 e Tabela 5.7.

Resultados para a PI para 4 eventos básicos, um em cada equipamento do sistema teste, conforme mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados obtidos pela Programação Inteira (PI) com casos corretos

	Pré- Diagnóstico			Diagnóstico da PI			
Teste	Evento	Função de avaliação esperada	Conjunto de alarmes recebidos	Evento	Falho	Falso	Função Objetivo
1	T1 OK	10	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	T1 OK	Ø	Ø	10
2	L1 falha CB7	10	CB4, CB5, CB6, CB9, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	L1 falha CB7	Ø	Ø	10
3	A1 falha CB1	10	CB2,CB3,A1F,A2NF,A3NF,A4NF,T1FD,T2FD,T3NF, T4NF,T5NF,T6NF,T7NF,T8NF	A1 falha CB1	Ø	Ø	10
4	B1 OK	10	CB4,CB5,CB6,CB7,CB9,B1F,B2NF,B3NF,B4NF,B5NF,B6NF,B7NF,B8NF,A1NF,A2NF,A3NF,A4NF,L1FD,L2FD,L3FD,L4FD,L4NF,L5NF,L6NF,L7NF,L8NF,T1FP,T2FP,T3NF,T4NF,T5NF,T6NF,T7NF, T8NF	B1 OK	Ø	Ø	10

Para testar a capacidade da PI em identificar alarmes falhos, foram retirados alarmes dos conjuntos de cada um destes eventos e montado o segundo grupo de testes aplicados, testes 5 a 8 na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados obtidos pela Programação Inteira (PI) com casos falhos

	Pré- Diagnóstico			Diagnóstico da PI			
Teste	Evento	Função de avaliação esperada	Conjunto de alarmes recebidos	Evento	Falho	Falso	Função Objetivo
5	T1 OK - T2NF	40	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	T1 OK	T2NF	Ø	40
6	L1 falha CB7 -CB5	40	CB4, CB6, CB9, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	L1 falha CB7	CB5	Ø	40
7	A1 falha CB1 - T1FD e T2FD	70	CB2, CB3, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	A1 falha CB1	T1FD e T2FD	Ø	70
8	B1 OK - CB4, CB5 e CB6	100	CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	B1 OK	CB4, CB5 e CB6	Ø	100

A partir dos mesmos 4 eventos bases e seus alarmes, foram acrescentados alguns alarmes aos conjuntos de alarmes recebidos, testes 9 ao12, para que cada algoritmo identificar os alarmes falsos de cada conjunto, como mostra a Tabela 5.6.

Por fim, na Tabela 5.7, foram unidos os grupos de alarmes de cada um dos eventos para a simulação da ocorrência de múltiplos eventos, obtendo assim os testes 13, 14 e 15.

Tabela 5.6 – Resultados obtidos pela Programação Inteira (PI) com casos falsos

Teste	Pré- Diagnóstico			Diagnóstico da PI			
	Evento	Função de avaliação esperada	Conjunto de alarmes recebidos	Evento	Falho	Falso	Função Objetivo
9	T1 OK + CB3	100	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD	T1 OK e T1 falha CB2	CB1	Ø	40
10	L1 falha CB7 + CB39	100	CB4, CB5, CB6, CB9, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF, CB39	L1 falha CB7	Ø	CB39	100
11	A1 falha CB1 +T2FP +B4F	190	CB2, CB3, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF, T2FP , B4F	A1 falha CB1	Ø	T2FP e B4F	190
12	B1 OK + L3FP + L4FP	190	CB4, CB5, CB6, CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD	B1 OK	Ø	L3FP e L4FP	190

Tabela 5.7 – Resultados obtidos pela Programação Inteira (PI) para múltiplos eventos

Teste	Pré- Diagnóstico			Diagnóstico da PI			
	Evento	Função de avaliação esperada	Conjunto de alarmes recebidos	Evento	Falho	Falso	Função Objetivo
13	T1 OK + L1 falha CB7	20	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF, CB5, CB6, CB9, CB11, L1F, L2NF, L3NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP	T1 OK + L1 falha CB7	Ø	Ø	20
14	T1 OK + L1 falha CB7 + A1 falha CB1	30	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF, CB5, CB6, CB9, CB11,L1F, L2NF, L3NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, CB3, T1FD, T2FD,	T1 OK + L1 falha CB7 + A1 falha CB1	Ø	Ø	30
15	T1 OK + L1 falha CB7 + A1 falha CB1 + B1 OK	40	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD	T1 OK + L1 falha CB7 + A1 falha CB1 + B1 OK	Ø	Ø	40

Como os testes aplicados foram criados com base nos padrões de relação entre alarmes e eventos, cada teste possui um valor de função objetivo já esperado, conforme a quantidade de eventos, alarmes falsos e falhos. Em todos os testes aplicados o modelo convergiu para a resposta esperada, exceto no teste 9, onde a PI convergiu a um valor menor de função objetivo, apresentando uma resposta matematicamente melhor. Esta resposta não necessariamente é melhor e mais próxima da real, do que a previamente esperada. Este tipo de resposta é o esperado de um processador de alarmes utilizado para a localização da seção em falta, pois a proximidade de suas respostas com a realidade dependerá de quão bem o modelo representa a realidade enfrentada nos centros de supervisão.

No teste 9, o algoritmo encontrou um valor menor de função objetivo o que justifica a resposta encontrada ser diferente da esperada é o alto valor da constante de importância relativa dos alarmes considerados falsos, pois uma vez que alarmes falsos não são tão comuns de serem recebidos pelos centros de controle, respostas que combinem eventos e alarmes falhos tendem a gerar funções objetivo menores.

Os resultados obtidos pela PI para o sistema teste utilizado com 128 alarmes e 104 eventos foram obtidos em um tempo de processamento mínimo, praticamente instantâneo, ocorrendo em menos de 0,001 segundos. Para verificar a robustez do método proposto foram realizadas simulações com sistemas fictícios de maior ordem de complexidade com relação ao número de informações de alarmes com 10 (dez) instâncias diferentes, cada instância é uma lista de eventos e alarmes que explicam um determinado evento. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.8 a seguir:

Tabela 5.8 – Resultados dos tempos computacionais para PI em problemas maiores

Nº de alarmes		Instâncias										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
100	Tempo em segundos	10,38	2,43	5,22	3,83	3,92	1,34	2,44	4,10	1,62	2,89	3,81
500		8,47	9,79	6,59	15,52	6,09	11,93	14,45	4,46	5,02	3,80	8,61
1000		25,76	22,70	18,57	15,23	17,35	46,39	16,25	12,88	12,25	22,24	20,96

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados da metodologia implementada para resolver o problema de processamento de alarmes e estimação da seção em falta ao nível de sistema de controle por meio da integração de duas técnicas: a Heurística Construtiva (HC) e a Programação Inteira (PI).

Com o uso do modelo de programação inteira binária foi possível encontrar a solução ótima para todos os experimentos em tempos computacionais muito reduzidos. Também sendo possível aplicá-lo diretamente a sistemas de tamanhos diferentes, sem nenhum tipo de ajuste. A limitação ainda se dá devido à elaboração dos padrões que é necessária, estando presente em todos os modelos até hoje apresentados para um processador de alarmes para o problema de estimação da seção em falta.

A heurística construtiva foi utilizada com o objetivo de inferir se o desligamento foi ou não originado a partir de um determinado equipamento ou, se for o caso indicar a direção da causa, com base nas sinalizações de disparo de relés e estado de disjuntores. Por meio desta estratégia conseguiu-se reduzir significativamente o número de mensagens associadas aos equipamentos pelos relés de proteção, tendo como vantagem a possibilidade de criação de um modelo generalista para cada equipamento, sendo transformador, barra ou linha de transmissão.

O modelo de programação inteira é um método matemático, determinístico, modelado a partir de restrições que são impostas por inequações mudando o estado de variáveis binárias, realizando desta forma o processamento dos alarmes de uma forma determinística. Uma vez definidos os valores das constantes da função objetivo e dados os conjuntos de eventos e alarmes, não há necessidade de mudança no modelo para o sistema.

A PI foi utilizada de modo a representar a filosofia de proteção como um todo relacionando a saída da HC com os disjuntores. Por meio disto foi possível modelar o modo como as proteções dos diversos equipamentos de rede detectam o defeito durante uma falta indicando sua localização.

Para os testes computacionais, foi usado um computador com processador Intel Quad-Core Xeon X3360 2.83 GHz. Os resultados mostram que o método de programação inteira proposto é promissor, pois em um tempo de processamento mínimo apresenta sempre o ótimo global do problema, não havendo dúvidas quanto ao resultado apresentado, além de tratar de modo natural a possibilidade de ocorrência de faltas simultâneas.

A facilidade de adaptação para qualquer sistema é devido ao fato de não ser necessário ajustes em parâmetros heurísticos, bastando apenas criar os novos padrões. que são imprescindíveis em algoritmos utilizados como processadores de alarmes. Além disto, as técnicas utilizadas permitem obter a solução ótima para todos os experimentos em tempos computacionais muito reduzidos.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões

O trabalho propôs uma nova metodologia destinada a resolver o problema de processamento de alarmes e estimação da seção em falta ao nível de sistema de controle por meio da integração de duas técnicas: a Heurística Construtiva (HC) e a Programação Inteira (PI).

A heurística construtiva foi utilizada como um elemento de classificação de falta em nível de equipamento. Por meio desta estratégia conseguiu-se reduzir significativamente o número de mensagens relativas a disparo de relés de proteção associadas aos equipamentos, tendo como vantagem a possibilidade de criação de um modelo generalista para cada equipamento.

Por outro lado, com a programação inteira binária foi possível encontrar a solução em nível de sistema, sendo, portanto o meio utilizado para interpretar as respostas individuais produzidas pela HC associada a cada equipamento da rede.

Os resultados mostram que o método proposto é promissor, pois em um tempo de processamento mínimo apresenta sempre o ótimo global do problema, não havendo dúvidas quanto ao resultado apresentado.

A limitação ainda se dá devido à elaboração dos padrões, tarefa árdua e que demanda muito conhecimento e tempo por parte do especialista, mas que faz parte de todas as técnicas até hoje apresentadas.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

- Avaliar o comportamento do método em um sistema elétrico real de alguma companhia de energia;
- Adicionar rotinas que utilizem as informações provenientes dos localizadores de faltas;
- Introduzir um sistema inteligente que realize uma pré-classificação de eventos;
- Modelar outros equipamentos, como por exemplo, geradores síncronos;
- Adicionar rotinas que considerem a ordem cronológica dos eventos.

6.3 Publicações que fundamentaram esta Tese

- **Eventos e Congressos Nacionais**

1. FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G. **Processamento de Alarmes e Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Potência Utilizando a Rede GRNN e os Algoritmos Genéticos**. IX CBRN. Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Ouro Preto, MG, Brasil, 25-28 Out, 2009.

2. MACHADO, T. M.; MORAIS, A. P.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M.; FRITZEN, P. C.; BOLZAN, R. **Análise comparativa do desempenho de várias arquiteturas de redes neurais artificiais aplicadas ao processamento de alarmes**. IX CBRN. Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Ouro Preto, MG, Brasil, 25-28 Out, 2009.

3. FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M. **Aplicação do Algoritmo Genético no Diagnóstico de Faltas e Processamento de Alarmes em Sistemas de Potência**. III ERPO. Encontro regional de Pesquisa Opercional da Região Sul. Porto Alegre - RS, Brasil, 26-27 Novembro, 2009.

4. FRITZEN, P. C.; ZAUK, J. M.; CARDOSO Jr, G.; MORAIS, A. P.; ARAÚJO, O. C. B. **Utilização Integrada de Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Genéticos para Problemas de Processamento de Alarmes e Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Energia**. In.SBSE 2010 (Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos). Belém - PA, Brasil, 18 a 21 de Maio, 2010.

5. ZAUK, J. M.; ARAÚJO, O. C. B.; FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; OBREGON, L. C.; Corrêa, R. **Programação Inteira Binária Aplicada ao Processamento de Alarmes em Sistemas Elétricos de Potência**. In. XVIII CBA (Congresso Brasileiro de Automática). Bonito - MS, Brasil, 12 a 17 de setembro, 2010.

6. OLIVEIRA, A. L.; ZAUK, J. M.; FRITZEN, P. C., CARDOSO Jr, G.; SOUZA, R. E. **Padrões de Treinamento para Classificação de Eventos com Base no Disparo de Relés de Proteção**. In SBSE 2012 (Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos). Goiânia - GO, Brasil, Abril, 2012.

- **Eventos e Congressos Internacionais**

1. FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M.; MORAIS, A. P. **Sistema Híbrido Fundamentado nas Redes GRNN e nos Algoritmos Genéticos para a Solução dos Problemas de Diagnóstico de Faltas e Processamento de Alarmes em Sistemas de Potência**. In.VIII CLAGTEE (Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica). Ubatuba-SP, Brasil, 2009.

2. FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M.; MORAIS, A. P.; BEZERRA, U. H.; BECK, J. A. P.; **Alarm Processing and Fault Diagnosis in Power Systems Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms** . In: IEEE International Conference on Industrial Technology, Vina del Mar. IEEE International Conference on Industrial Technology - ICIT 2010, p. 1-6, 14-17 March, 2010.

3. FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M.; MORAIS, A. P.; BEZERRA, U. H.; BECK, J. A. P. **Integrated use of Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms for Problems of Alarm Processing and Fault Diagnosis in Power Systems**. In: ACIIDS 2010, The 2nd Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, Hue City, Vietnam, 24-26 March, 2010.

4. FRITZEN, P. C.; ZAUK, J. M.; ARAÚJO, O. C. B.; CARDOSO Jr, G.; MORAIS, A. P. **Aplicação Integrada entre Redes Neurais GRNN e Programação Binária Baseada em Recobrimento no Problema de Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia**. In. CIDEL 2010 (International Congresso in Electricity Distribution). 27 a 29 de setembro. Buenos Aires, Argentina, 2010.

5. ZAUK, J. M.; FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr G.; ARAÚJO, O. C. B.; SANTOS, E. M. dos; CORRÊA, R. **Análise Crítica de Técnicas Computacionais Utilizadas na Classificação de Eventos com Base no Disparo de Relés de Proteção**. In: IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers/PES - Power and Energy Society, T&D Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin América IEEE/PES T&D2010 Latin América, São Paulo, Brasil, 2010.

6. FRITZEN, P. C.; ZAUK, J. M.; CARDOSO Jr, G.; ARAÚJO, O. C. B.; OLIVEIRA, A. L.; CORRÊA, R.; SCHMITT, A. L. **Sistema Híbrido Motivado na Heurística Construtiva e na Programação Inteira para a Solução dos Problemas de Processamento de Alarmes e Estimação de Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência**. In. IV CLAGTEE (Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica). Mar Del Plata, Argentina, 2011.

- **Revista Internacional**

1. FRITZEN, P. C.; ZAUK, J. M.; CARDOSO Jr, G.; OLIVEIRA, A. 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, 90, pp. 55-66. September, 2012.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, P.; PRADA, R. **Esquemas de Proteção de Sistemas de Energia Elétrica.** Editora EPUB, ISBN 85-387098-56-X, Rio de Janeiro, 308p., 2005.

ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. **Pesquisa Operacional.** Editora Campus/Elsevier, ISBN 85-352-1454-3, Rio de Janeiro, 523p., 2007.

BARROS, J. & DRAKE, J. M. **Real-time fault detection and classification in power systems using microprocessors**. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 4 (July), p. 315-322, 1994.

BATISTA, L. B. **Abordagem inteligente para tratamento de alarmes e diagnóstico de falhas em sistemas elétricos**. In: VI SIMPASE. Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. São Paulo, SP, Brasil, 2005.

BIONDI NETO, L. & CHIGANER, L. **Sistema especialista fuzzy no diagnóstico de falhas em transformadores.** In: XV SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Outubro de 1999: Paraná, Brasil). p. 1-6, 1997.

CAMINHA, A. C.; **Introdução à Proteção dos sistemas elétricos**. 6ª re-impressão. São Paulo: Edgard Blücher, 1977

CARNEIRO, M. E.; STELZER, G.; PILOTTO, M. J. **Implantação de automatismo e monitoramento de transformadores em SE's desassistidas**. In: XV SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Outubro de 1999: Paraná, Brasil). p. 1-6, 1999.

CARDOSO Jr., G. **Estimação da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialistas Realizada em Nível de Centro de Controle**. Florianópolis. 176p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CARDOSO Jr., G.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. **Treatment of the uncertainties involved in the electric power systems fault section estimation with the aid of probabilistic neural networks.** In: Proceedings of the V Brazilian Conference on Neural Networks – V Congresso Brasileiro de Redes Neurais (April 2001: Rio de Janeiro, RJ). p. 97-102, 2001.

CARDOSO Jr., G.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. **Application of Neural-Network Modules to Electric Power System Fault Section Estimation.** IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, n. 3, pp 1034-1041, July 2004.

CARDOZO, E.; TALUKDAR, S. N. **A distributed expert system for fault diagnosis.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 3, n. 2, p. 641–646, May, 1988.

CHANG, C. S.; CHEN, J. M.; SRINIVASAN, D. *et al*. **Fuzzy logic approach in power system fault section identification.** IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 5 (Sept.), p. 406-414, 1997.

CHEN, Wen-Hui. **Fault Section Estimation Using Fuzzy Matrix-Based Reasoning Methods.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, No. 1 (January), p. 205-213, 2011.

CORDENONSI, A. Z. **Ambientes, Objetos e Dialogicidade: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas**. Porto Alegre, 2008. Tese (Doutorado em Informática na Educação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2008.

COSLOVICH, L.; PESENTI, R.; UKOVICH, W. **Large-scale set partitioning problems: some real-world instances hide a beneficial structure**. Ûkio Technologinis ir Ekonominis Vystymas Technological and Economic Development of Economy, http://www.tede.vgtu.lt, ISSN 1392-8619 print/ISSN 1822-3613 online, 2006, vol. XII, no. 1, pp. 18–22, 2006.

COUTTO FILHO, M. B. do; RODRIGES, M. A. P.; SOUZA, J. C. S. *et al.* **Localização de defeitos em sistemas de energia elétrica utilizando sistemas inteligentes**. In: XV SNPTEE, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (Outubro 1999: Paraná, Brasil). p.1-7, 1999.

DAVIDSON, E. M.; McARTHUR, S. D. J.; McDONALD, J. R; CUMMING, T.; WATT, I. **Applying Multi-Agent System Technology in Practice: Automated Management and Analysis of SCADA and Digital Fault Recorder Data.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 2 (May), p. 559-567, 2006.

DIAZ, A. F.; VELARDE, J. L. G.; LAGUNA, M.; MOSCATO, P.; TSENG, F. T.; GLOVER, F.; GHAZIRI, H. M. **Optimización Heurística y Redes Neuronales.** Editorial Paraninfo, Madrid, 1996.

DYLIACCO, T. E. & KRAYNAK, T. J. **Processing by logic programming of circuit breaker and protective relaying information**. IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 2 (Feb.), 1969.

EL-SAYED, M. A. H.; ALFUHAID, A. S. **ANN-based approach for fast fault diagnosis and alarm handling of power systems.** In: APSCOM-00. International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. [S.l.]. v. 1, p. 54–58, 2000.

FLISCOUNAKIS, S.; ZAOUI, F.; SIMEANT, G.; GONZALEZ, R. **Topology Influence on Loss Reduction as a Mixed Integer Linear Programming Problem**. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. Digital Object Identifier: 10.1109/PCT.2007.4538622, pp. 1987 – 1990, 2007.

FRISCH, A. C.; CARDOSO, M. G.; ARRUDA, L. V. R. **Processamento inteligente de alarmes em centros de operação de estações.** In: III SIMPASE. Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M.; MORAIS, A. P. **Sistema Híbrido Fundamentado nas Redes GRNN e nos Algoritmos Genéticos para a Solução dos Problemas de Diagnóstico de Faltas e Processamento de Alarmes em Sistemas de Potência**. In.VIII CLAGTEE (Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica). Ubatuba-SP, Brasil, 2009.

FRITZEN, P. C.; CARDOSO Jr, G.; ZAUK, J. M.; MORAIS, A. P.; BEZERRA, U. H.; BECK, J. A. P. **Alarm Processing and Fault Diagnosis in Power Systems Using Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms** . In: IEEE International Conference on Industrial Technology, Vina del Mar. IEEE International Conference on Industrial Technology - ICIT , p. 1-6, 2010a.

FRITZEN, P. C.; ZAUK, J. M.; CARDOSO Jr, G.; MORAIS, A. P.; ARAÚJO, O. C. B. **Utilização Integrada de Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Genéticos para Problemas de Processamento de Alarmes e Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Energia**. In.SBSE 2010 (Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos). Belém - PA, Brasil, 18 a 21 de Maio, 2010b.

FRITZEN, P. C.,; ZAUK, J. M.; ARAÚJO, O. C. B.; CARDOSO Jr, G.; MORAIS, A. P. **Aplicação Integrada entre Redes Neurais GRNN e Programação Binária Baseada em Recobrimento no Problema de Diagnóstico de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia**. In. CIDEL 2010 (International Congresso in Electricity Distribution). 27 a 29 de setembro. Buenos Aires, Argentina, 2010c.

FRITZEN, P. C.; ZAUK, J. M.; CARDOSO Jr, G.; ARAÚJO, O. C. B.; OLIVEIRA, A. L.; CORRÊA, R.; SCHMITT, A. L. **Sistema Híbrido Motivado na Heurística Construtiva e na Programação Inteira para a Solução dos Problemas de Processamento de Alarmes e Estimação de Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência**. In. IV CLAGTEE (Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica). Mar Del Plata, Argentina, 2011.

FRITZEN, P. C.,; ZAUK, J. M.; CARDOSO Jr, G.; OLIVEIRA, A. 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, 90, pp. 55-66. September, 2012.

GELMAN, G.; CARLIN J.B.; STERN, H.S.; RUBIN D.B. **Bayesian Data Analysis.** CRS Press, Chapman &Hall, London, U.K. (Second Ed.). 2004.

GERS, J. M.; HOLMES, E. J. **Protection of electricity distribution networks** – 2nd ed. The Institution of Electrical Engineers – IEE, London, United Kingdom, ISBN 0 86341 357 9, 2004.

GOLDBARG, M. C; LUNA, H. P. **Otimização combinatorial e programação linear** (2ª ed.). Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier. 2005.

GOLDBERG, David Edward. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Editora Addison-Wesley, USA, p. 412, 1989.

HANDSCHIN, E.; KUHLMANN, D.; HOFFMANN, W. **System Fault Diagnosis.** University of Dortmund. Edited by M. A. El-Sharkawi and Dagmar Niebur, Chapter 11. p. 138-149, 1996.

HOLLAND, John Henry. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. Editora MIT Press, USA, p. 211, 1992.

HOR, C.; CROSSLEY, P. A. **Knowledge extraction from intelligent electronic devices**. In: Transactions on Rough Sets III. LNCS, vol. 3400, pp. 82–111. Springer, Heidelberg. 2005.

HOSSAK, J. A.; MENAL, J.; McARTHUR, S. D. J.; McDONALD, J. R. **A Multiagent Architecture for Protection Engineering Diagnostic Assistance.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2 (May), p. 639-647, 2003.

IEEE COMMITTEE REPORT. **Review of recent practices and trends in protective relaying.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8 (Aug.), p. 4054-4063, 1981.

JÜNGER, M.; LIEBLING, T.; NADDEF, D.; NEMHAUSER, G., PULLEYBLANK, W.; REINELT, G., RINALDI, G.; WOLSEY, L. A. eds**.: 50 Years of Integer Programming 1958-2008: From the Early Years to the State-of-the-Art**. Springer Heidelberg, 2010.

KEZUNOVIC, M. & GUAN, Y. **Intelligent Alarm Processing: From Data Intensive to Information Rich,** 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS '09, pp. 1–8. 2009.

KEZUNOVIC, M. & GUAN, Y. **Intelligent Alarm Processor**, ERCOT Project Final Report, TEES, Mar. 2008.

KIRSCHEN, D. S.; WOLLENBERG, B. F. **Intelligent alarm processing in power systems**. In: IEEE. Proceedings of the IEEE. [S.l.], v. 80, n. 5, p. 663–672, 1992.

LEÃO, F. B.; DA SILVA, L. G. W.; MANTOVANI , J. R. S. **Localização de faltas em sistemas de energia elétrica através de um Modelo de programação binária e algoritmo genético**. In: In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador, BA, Brasil, 2006.

LEÃO, F. B.; PEREIRA, R. A. F.; MANTOVANI , J. R. S. **Fault Section Estimation in Automated Distribution Substations**. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting. PES '09, pp. 1-8, 2009.

LEE, H.J.; PARK, D.-Y.; AHN, B.-S. *et al*. **A Fuzzy Expert System for the Integrated Fault Diagnosis.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 2 (April), p. 833-838, 2000.

LIN, W.; LIN, C.; SUN, Z. **Adaptive multiple fault detection and alarm processing for loop system with probabilistic network**. IEEE Trans. Power Del., vol. 19, Jan., no. 1, pp. 64–69, 2004.

LIMIN, H.; YONGLI, Z.; RAN, L.; LIGUO, Z. **Novel Method for Power System Fault Diagnosis Based on Bayesian Network.** In: International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004. Singapore, 21-24 November, 2004.

MACHADO, T. M. *et al*. **Análise comparativa do desempenho de várias arquiteturas de redes neurais artificiais aplicadas ao processamento de alarmes**. IX CBRN. Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.

MASON, C. R. **The art and science of protective relaying**. 5th Edition. New York: John Wiley, 1956.

MEZA, E. M. *et al*. **Exploring fuzzy relations for alarm processing and fault location in electrical power systems.** In: IEEE. Proc. Porto Power Tech. v. 3. Porto, Portugal, 2001.

MILANOVIĆ, J. V.; AVENDAÑO-MORA M. **Generalized formulation of the optimal monitor placement problem for fault section**. Electric Power Systems Research, 93, 2012.

MIN, S. W.; SOHN, J. M.; KIM, K. H. **Adaptive fault section estimation using matrix representation with fuzzy relations.** IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 842–848, 2004.

MIRANDA, V.; SRINIVASAN, D.; PROENÇA, L. M. **Evolutionary computation in power systems**. 12th Power Systems Computations Conference, Dresden (Aug, 19-23), p. 25-40, 1996.

MIRANDA, V.; SRINIVASAN, D.; PROENÇA, L. M. **Evolutionary computation in power systems**. Electric Power & Energy Systems, Vol. 20, No.2, p. 89-98, 1998.

NEIS, P.; **Processamento inteligente de alarmes empregando algoritmos genéticos**. Curitiba, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2006.

NEGNEVITSKY, M.; PAVLOVSKY, V. **Neural Networks Approach to Online Identification of Multiple Failures of Protection Systems.** IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 20, no. 2, Apr., pp. 588–594, 2005.

NEIS, P.; KRAUSS, C.; FRISCH, A.; DELGADO, M. **Processamento de alarmes em sistemas elétricos de potência utilizando algoritmos genéticos.** Anais do VI SIMPASE. Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. São Paulo, SP, Brasil, v.1. p. 1-9, 2005.

ONS. 2009. **Informativo ONS**. Ano I, nº 06, novembro de 2009. [on-line] Disponível em: http://www.ons.org.br/newsletters/informativos/nov2009/06-materia01.html. Acesso em: 23 mar. 2012.

PARK, D. Y.; AHN, B. S.; KIM, S. H. *et al.* **Dealing Uncertainties in the Fault Diagnosis System.** In: INTELLIGENT SYSTEM APPLICATION TO POWER SYSTEMS (ISAP'99 April 4-8, 1999: Rio de Janeiro, Brazil). p. 273-277, 1999.

RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência Artificial.** São Paulo: Makron Books, 1993.

SADEGHEIH, A. **Optimization of network planning by the novel hybrid algorithms of intelligent optimization techniques**. Energy, 34, p. 1539-1551, 2009.

SAKAGUCHI, T. & MATSUMOTO, K. **Development of Knowledge Based System for Power System Restoration.** IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-I03:# 2, February, pp. 320-329, 1983.

SANTOS, V. A. **Proteção de Distância Aplicada a Linhas de Transmissão em Circuito Duplo**. Rio de Janeiro, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.

SHUI, A.; CHEN, W.; ZHANG, P.; HU, S.; HUANG, X. **Review of Fault Diagnosis in Control Systems**. In: IEEE Chinese Control and Decision Conference – CCDC 2009, p. 5324-5329. 2009.

SILVER, E. A. **An overview of heuristic solution methods.** Journal of the Operational Research Society, 55, pp. 936-956. 2005.

SILVER, E. A.;Victor, R.; VIDAL, V.; WERRA, D. **A tutorial on heuristic methods.** European Journal of Operational Research, 5(3), pp. 153-162. 1980.

SONG, H. e KESUNOVIC, M. **A new analysis method for early detection and prevention of cascading events**. Electric Power Systems Research, vol. 77, issue 8, p. 1132-1142, 2007.

SOUZA, J. C. S.; RODRIGUES, M. A. P.; SCHILLING, M. T. *et al*. **Processamento de Alarmes e Localização de Defeitos em Sistemas de Potência Utilizando Redes Neurais**. In: VII Symposium of Specialists in Electrical Operational and Expansion Planning (May. 2000: Curitiba, Paraná). p. 1-6, 2000.

SOUZA, J.; MEZA, E.; SCHILLING, M.; FILHO, M. D. C. **Alarm processing in electrical power systems through a neuro-fuzzy approach**. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19, no. 2, Apr., pp. 537–544, 2004.

SPECHT, D. F. **A General Regression Neural Network**. IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 2, Nº 6 (Nov.), pp. 558–576, 1991.

SRINIVASAN, D.; LIEW A. C.; CHANG, C. S. **Applications of fuzzy systems in power systems.** Electric Power Systems Research, 35, p. 39-43, 1995.

STEMMER, F. A. & BASTOS, A. C. A. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Edição do Departamento de Engenharia de Manutenção, Vol. 2. CEEE, Porto Alegre – RS, 1977.

TANOMARU, J. **Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos**. In: II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, Anais. Curitiba, PR, Brasil: [s.n.], 1995.

URAIKUL, V.; CHAN, W. C.; TONTIWACHWUTHIKUL, P. **Artificial intelligence for monitoring and supervisory control of process systems**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.20, No.2, 115-131, 2007.

WEISE, T. **Global Optimizations Algorithms, Theory and Applications**. 2nd Edition, pp. 820, June 26, 2009.

WEN, F. e CHANG, C. S. **A tabu search approach to fault section estimation in power systems.** Electric Power Systems Research, 40, p. 63-73, 1997a.

WEN, F. S.; CHANG, C.S. **Tabu search approach to alarm processing in power systems**. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 144, nº 1, January, p. 160-168, 1997b.

WEN, F. S. e CHANG, C. S. **Possibilistic-diagnosis theory for fault-section estimation and state identification of unobserved protective relays using tabu-search method**. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 6 (Nov.), p. 722-730, 1998.

WEN, F. e HAN, Z.; **Fault section estimation in power systems using a genetic algorithm.** Electric Power Systems Research, 34, p. 165-172, 1995.

WEN, F. S.; CHANG, C.S.; SRINIVASAN, D. **Alarm Processing in Power Systems Using a Genetic Algorithm**. IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Volume 1, 29 Nov.-1 Dec., p. 27-32, 1995.

WEN, F. S.; CHANG, C.S.; SRINIVASAN, D. **Probabilistic approach for fault-section estimation in power systems based on a refined genetic algorithm**. IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. Vol. 144, nº 2, March, p. 160-168, 1997.

WU, Xin; GUO, Chuang-xin; CAO, Yi-jia. **New Fault Diagnosis Approach of Power System Based on Bayesian Network and Temporal Order Information**. Proceedings of China Electrotechnical Society, Csee, 2005-13, 2005.

WU, Y.; KEZUNOVIC, M.; KOSTIC, T. **An Advanced Alarm Processor using Two-level Processing Structure**. IEEE Power Tech, Lausanne. pp.125–130, 2007.

XIAO, Jian; WEN, Fushuan. **Combined Use of Fuzzy Set-Covering Theory and Mode Identification Technique for Fault Diagnosis in Power Systems**. In. IEEE Power Engineering Society General Meeting.. Page(s): 1 – 5, 2007.

ZANAKIS, S. H.; EVANS, J. R. Heuristic Optimization: **Why, when and how to use it**. Interfaces, v.11, n.5, out. 1981.

ZAUK, J. M.; FRITZEN, P. C.; CARDOSO JR, G.; ARAÚJO, O. B.; SANTOS, E. M. dos; CORRÊA, R. **Análise Crítica de Técnicas Computacionais Utilizadas na Classificação de Eventos com Base no Disparo de Relés de Proteção**. In: IEEE/PES T&D . Proc. Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America. São Paulo, SP, Brasil, 2010.

ZHANG, C.; LIAO, J. ZHU, X. **Probabilistic Event-driven Heuristic Fault Localization using Incremental Bayesian Suspected Degree**. The 9th International Conference for Young Computer Scientists, IEEE Computer Society, p. 652-658, 2008.

ZHANG, J.; HE, Z. Y. **Distribution System Fault Diagnosis Scheme Based on Multiple Information Sources**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2009. p.:27-31 March, 2009.

ZHAO, W.; BAI, X.; WANG, W.; DING, J. **A Novel Alarm Processing and Fault Diagnosis Expert System Based on BNF Rules**. In: IEEE/PES Transmission and Distribution, Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Tabela de relação causa/consequência, de alarmes e eventos do sistema teste utilizado

- *Transformador: Número da falta 1 à 24*
- *Linha de Transmissão: Número da falta 25 à 48*
- *Barra: Número da falta 49 à 104*

Nº Falta	Falta Estimada	Sinais de Alarmes	Ocorrência da falta
1	Trafo T1	CB2, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
2	Trafo T1	CB1, CB3, CB4, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB2
3	Trafo T1	CB2, CB5, CB6, CB7, CB9, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1F, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB4
4	Trafo T2	CB3, CB5, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T2F, T1NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
5	Trafo T2	CB1, CB2, CB5, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF,	FALHA CB3

		B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T2F, T1NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	
6	Trafo T2	CB3, CB4, CB6, CB7, CB9, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T2F, T1NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB5
7	Trafo T3	CB14, CB16, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3F, T1NF, T2NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
8	Trafo T3	CB12, CB13, CB15, CB16, CB19, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3F, T1NF, T2NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB14
9	Trafo T3	CB14, CB17, CB18, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3F, T1NF, T2NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB16
10	Trafo T4	CB15, CB17, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T4F, T1NF, T2NF, T3NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
11	Trafo T4	CB12, CB13, CB14, CB17, CB19, B1NF, B2NF,	FALHA CB15

		B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T4F, T1NF, T2NF, T3NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	
12	Trafo T4	CB15, CB16, CB18, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T4F, T1NF, T2NF, T3NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB17
13	Trafo T5	CB22, CB24, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
14	Trafo T5	CB21, CB23, CB24, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB22
15	Trafo T5	CB22, CB25, CB26, CB27, CB29, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB24
16	Trafo T6	CB23, CB25, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T6F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T7NF, T8NF	O.K.
17	Trafo T6	CB21, CB22, CB25, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF,	FALHA CB23

		B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T6F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T7NF, T8NF	
18	Trafo T6	CB23, CB24, CB26, CB27, CB29, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T6F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T7NF, T8NF	FALHA CB25
19	Trafo T7	CB34, CB36, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T8NF	O.K.
20	Trafo T7	CB31, CB33, CB35, CB36, CB40, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T8NF	FALHA CB34
21	Trafo T7	CB34, CB37, CB38, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T8NF	FALHA CB36
22	Trafo T8	CB35, CB37, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T8F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF	O.K.
23	Trafo T8	CB31, CB33, CB34, CB37, CB40, B1NF, B2NF,	FALHA CB35

		B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T8F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF	
24	Trafo T8	CB35, CB36, CB38, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T8F, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF	FALHA CB37
25	Linha L1	CB7, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
26	Linha L1	CB4, CB5, CB6, CB9, CB11, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB7
27	Linha L1	CB7, CB13, CB20, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1F, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB11
28	Linha L2	CB8, CB12, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L2F, L1NF, L3NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
29	Linha L2	CB6, CB10, CB12, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF,	FALHA CB8

		B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L2F, L1NF, L3NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	
30	Linha L2	CB8, CB13, CB19, CB14, CB15, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L2F, L1NF, L3NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1FP, T2FP, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB12
31	Linha L3	CB9, CB28, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L3F, L1NF, L2NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	O.K.
32	Linha L3	CB4, CB5, CB6, CB7, CB28, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L3F, L1NF, L2NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB9
33	Linha L3	CB9, CB26, CB30, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L3F, L1NF, L2NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB28
34	Linha L4	CB10, CB27, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L4F, L1NF, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	O.K.
35	Linha L4	CB6, CB8, CB27, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF,	FALHA CB10

		B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L4F, L1NF, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	
36	Linha L4	CB10, CB24, CB25, CB26, CB29, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L4F, L1NF, L2NF, L3NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB27
37	Linha L5	CB19, CB32, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FDP, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF	O.K.
38	Linha L5	CB13, CB14, CB15, CB19, CB32, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FDP, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF	FALHA CB19
39	Linha L5	CB19, CB33, CB39, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L6NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FDP, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF	FALHA CB32
40	Linha L6	CB20, CB31, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L6F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L5NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF	O.K.
41	Linha L6	CB11, CB13, CB31, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF,	FALHA CB20

		B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L6F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L5NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF	
42	Linha L6	CB20, CB33, CB34, CB35, CB40, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L6F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L5NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF	FALHA CB31
43	Linha L7	CB29, CB39, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L5NF, L6NF, L8NF, T7FD, T8FD, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF	O.K.
44	Linha L7	CB24, CB25, CB26, CB27, CB39, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L5NF, L6NF, L8NF, T7FD, T8FD, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF	FALHA CB29
45	Linha L7	CB29, CB32, CB33, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7F, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, T7FD, T8FD, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF	FALHA CB39
46	Linha L8	CB30, CB40, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L8F, L1NF, L2NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	O.K.
47	Linha L8	CB26, CB28, CB40, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF,	FALHA CB30

		B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L8F, L1NF, L2NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	
48	Linha L8	CB30, CB31, CB33, CB34, CB35, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L8F, L1NF, L2NF, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T5FP, T6FP, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB40
49	Barra A1	CB1, CB2, CB3, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
50	Barra A1	CB2, CB3, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB1
51	Barra A1	CB1, CB3, CB4, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB2
52	Barra A1	CB1, CB2, CB5, A1F, A2NF, A3NF, A4NF, T1FD, T2FD, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB3
53	Barra A2	CB16, CB17, CB18, A2F, A1NF, A3NF, T3FP, T4FP, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
54	Barra A2	CB14, CB17, CB18, A2F, A1NF, A3NF, T3FP, T4FP, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB16
55	Barra A2	CB15, CB16, CB18, A2F, A1NF, A3NF, T3FP, T4FP, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB17
56	Barra A2	CB16, CB17, A2F, A1NF, A3NF, T3FP, T4FP, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	FALHA CB18
57	Barra A3	CB21, CB22, CB23, A3F, A1NF, A2NF, A4NF,	O.K.

		T5FD, T6FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	
58	Barra A3	CB22, CB23, A3F, A1NF, A2NF, A4NF, T5FD, T6FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB21
59	Barra A3	CB21, CB23, CB24, A3F, A1NF, A2NF, A4NF, T5FD, T6FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB22
60	Barra A3	CB21, CB22, CB25, A3F, A1NF, A2NF, A4NF, T5FD, T6FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	FALHA CB23
61	Barra A4	CB36, CB37, CB38, A4F, A1NF, A2NF, A3NF, T7FP, T8FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	O.K.
62	Barra A4	CB34, CB37, CB38, A4F, A1NF, A2NF, A3NF, T7FP, T8FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	FALHA CB36
63	Barra A4	CB35, CB36, CB38, A4F, A1NF, A2NF, A3NF, T7FP, T8FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	FALHA CB37
64	Barra A4	CB36, CB37, A4F, A1NF, A2NF, A3NF, T7FP, T8FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	FALHA CB38
65	Barra B1	CB4, CB5, CB6, CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
66	Barra B1	CB2, CB5, CB6, CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP,	Falha CB4

		T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	
67	Barra B1	CB3, CB4, CB6, CB7, CB9, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB5
68	Barra B1	CB4, CB5, CB7, CB8, CB9, CB10, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB6
69	Barra B1	CB4, CB5, CB6, CB9, CB11, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB7
70	Barra B1	CB4, CB5, CB6, CB7, CB28, B1F, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB9
71	Barra B2	CB6, CB8, CB10, B2F, B1NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
72	Barra B2	CB4, CB5, CB7, CB8, CB9, CB10, B2F, B1NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD,	Falha CB6

		L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	
73	Barra B2	CB6, CB10, CB12, B2F, B1NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB8
74	Barra B2	CB6, CB8, CB27, B2F, B1NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L1FD, L2FD, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7NF, L8NF, T1FP, T2FP, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB10
75	Barra B3	CB12, CB13, CB14, CB15, CB19, B3F, B1NF, B2NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
76	Barra B3	CB8, CB13, CB14, CB15, CB19, B3F, B1NF, B2NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB12
77	Barra B3	CB11, CB12, CB14, CB15, CB19, CB20, B3F, B1NF, B2NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB13
78	Barra B3	CB12, CB13, CB15, CB16, CB19, B3F, B1NF,	Falha CB14

		B2NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	
79	Barra B3	CB12, CB13, CB14, CB17, CB19, B3F, B1NF, B2NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB15
80	Barra B3	CB12, CB13, CB14, CB15, CB32, B3F, B1NF, B2NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB19
81	Barra B4	CB11, CB13, CB20, B4F, B1NF, B2NF, B3NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	O.K.
82	Barra B4	CB7, CB13, CB20, B4F, B1NF, B2NF, B3NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB11
83	Barra B4	CB11, CB12, CB14, CB15, CB19, CB20, B4F, B1NF, B2NF, B3NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB13

84	Barra B4	CB11, CB13, CB31, B4F, B1NF, B2NF, B3NF, B5NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FD, L6FD, L1FP, L2FP, L3NF, L4NF, L7NF, L8NF, T3FD, T4FD, T1NF, T2NF, T5NF, T6NF, T7NF, T8NF	Falha CB20
85	Barra B5	CB24, CB25, CB26, CB27, CB29, B5F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	O.K.
86	Barra B5	CB22, CB25, CB26, CB27, CB29, B5F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB24
87	Barra B5	CB23, CB24, CB26, CB27, CB29, B5F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB25
88	Barra B5	CB24, CB25, CB27, CB28, CB29, CB30, B5F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB26
89	Barra B5	CB10, CB24, CB25, CB26, CB29, B5F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP,	Falha CB27

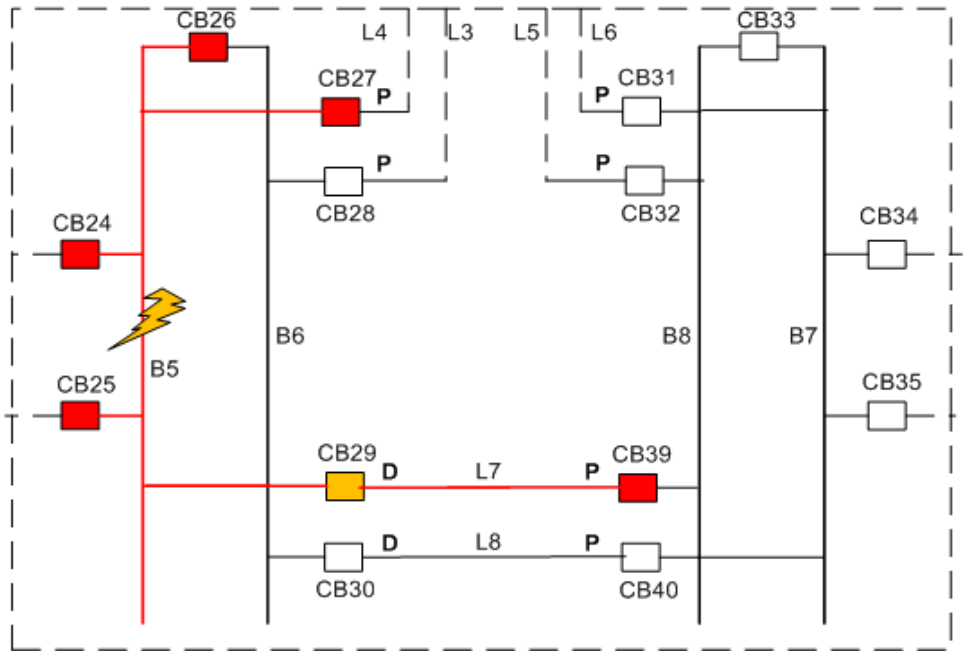
		T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	
90	Barra B5	CB24, CB25, CB26, CB27, CB39, B5F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB29
91	Barra B6	CB26, CB28, CB30, B6F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	O.K.
92	Barra B6	CB24, CB25, CB27, CB29, B6F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB26
93	Barra B6	CB26, CB30, CB9, B6F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB28
94	Barra B6	CB26, CB28, CB40, B6F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L7FD, L8FD, L3FP, L4FP, L1NF, L2NF, L5NF, L6NF, T5FP, T6FP, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T7NF, T8NF	Falha CB30
95	Barra B7	CB31, CB33, CB34, CB35, CB40, B7F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD,	O.K.

		T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	
96	Barra B7	CB20, CB33, CB34, CB35, CB40, B7F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB31
97	Barra B7	CB31, CB32, CB34, CB35, CB39, CB40, B7F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB33
98	Barra B7	CB31, CB33, CB35, CB36, CB40, B7F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB34
99	Barra B7	CB31, CB33, CB34, CB36, CB40, B7F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB35
100	Barra B7	CB30, CB31, CB33, CB34, CB35, B7F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B8NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB40
101	Barra B8	CB32, CB33, CB39, B8F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF,	O.K.

		T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	
102	Barra B8	CB19, CB33, CB39, B8F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB32
103	Barra B8	CB31, CB32, CB34, CB35, CB39, CB40, B8F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB33
104	Barra B8	CB29, CB32, CB33, B8F, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5NF, B6NF, B7NF, A1NF, A2NF, A3NF, A4NF, L5FP, L6FP, L7FP, L8FP, L1NF, L2NF, L3NF, L4NF, T7FD, T8FD, T1NF, T2NF, T3NF, T4NF, T5NF, T6NF	Falha CB39

APÊNDICE B - Exemplo aplicado do método proposto de estimativa de seção em falta para um curto-circuito na Barra 5

Para exemplificar a atuação da metodologia desenvolvida é apresentada a seguir uma parte ampliada do sistema teste onde aparece um curto-circuito na barra 5.



Em seguida, devido à contingência do curto-circuito na barra 5, com falha de atuação do disjuntor CB29, surgem os alarmes provenientes do sistema supervisório, que são apresentados ao usuário,como segue:

B5 {87, 86, 86BF}

{CB24},

{CB25},

{CB26},

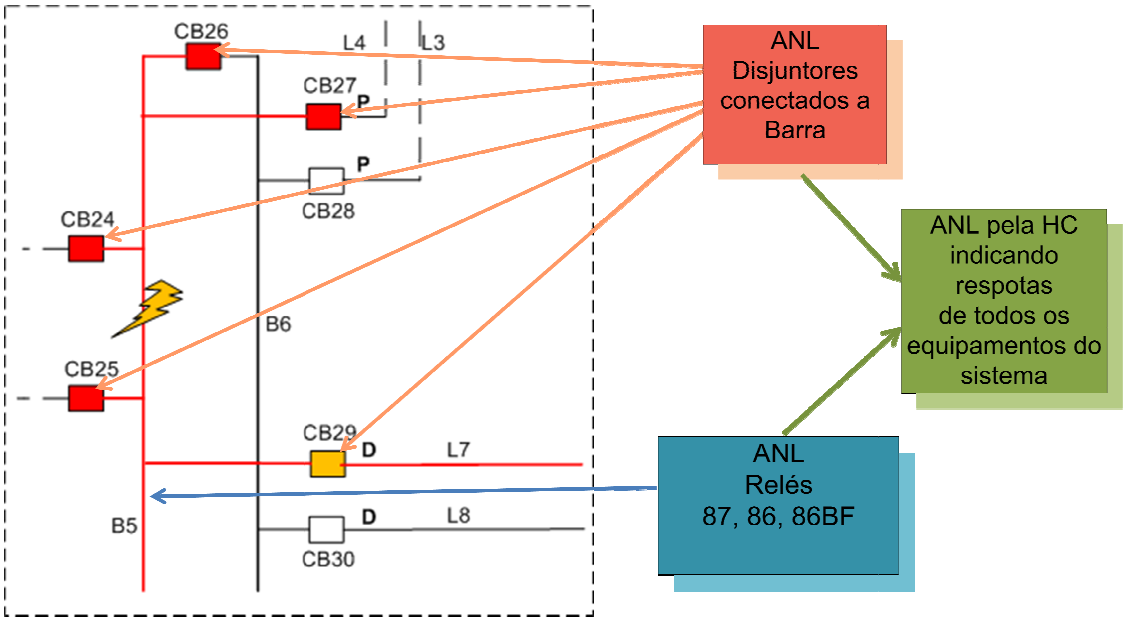
{CB27},

{CB39},

L7 {P_21-2T, P_21-2, P_21-3}

L4 {D_21-2, D_21-3}

Primeiramente ocorre a Análise em Nível Local (ANL), com a atuação da Heurística Construtiva (HC), como mostra a ilustração a seguir. Assim, as informações dos disjuntores conectados a barra 5 juntamente com as informações dos relés 87,86, 86BF ativam a HC que indica como resposta falta na barra 5 e a direção da falta para a linha de transmissão 7, neste caso, na direção D.



Modelagem da Heurística Construtiva (HC) para a barra 5:

Barra 5: os relés ativados para esta barra são 87, 86 e 86BF.

Assim, o vetor de alarmes recebidos para o curto-circuito na barra 5 apresenta a seguinte configuração:

[87 86 27/59 CBs 86BF]

Que corresponde ao vetor com os seguintes valores binários:

[1 1 0 0 1]

O campo CBs do vetor segue a lógica E, ou seja, os disjuntores que deveriam atuar para a proteção da barra 5 são CB24, CB25, CB26, CB27, CB29. Entretanto, como houve falha de atuação do disjuntor CB29, o valor binário para CBs recebe o valor “0”.

A ativação da HC é fundamentada no produto interno entre a matriz base de dados para as barras com os padrões de eventos (Tabela 4.2) e o vetor de alarmes recebidos.

A matriz base de dados com os padrões de eventos para a barra é mostrada a seguir:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Seguindo a metodologia da HC, o produto interno entre o vetor e a matriz é dado por:

$$[\,1\ 1\ 0\ 0\ 1\,] * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

O resultado deste produto interno é dado pelo seguinte vetor:

[2 2 3 3 1 1 1 1 1 1 2 2 0 0 0 1 1]

Repetindo a operação, porém "negando" os valores do vetor e da matriz, ou seja, trocando os valores de "0" por "1" e vice-versa, temos:

$$[\,0\ 0\ 1\ 1\ 0\,] * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Assim, o resultado deste novo produto interno é dado pelo seguinte vetor:

[1 0 2 1 1 0 2 1 1 0 1 2 1 1 2 1]

Somando as duas respostas tem-se:

[2 2 3 3 1 1 1 1 1 1 2 2 0 0 0 1 1] + [1 0 2 1 1 0 2 1 1 0 1 2 1 1 2 1] =

= [3 2 **5** 4 2 2 3 2 2 2 3 2 1 1 3 2]

Verifica-se que a maior resposta encontrada é o valor 5 que corresponde ao evento três (e3) 3 da Tabela 4.2.. Desta maneira a HC obtém como resposta o evento três (e3) indicando falta interna na barra 5 (B5F).

O mesmo procedimento é realizado para os equipamentos adjacentes a barra 5 e suas respostas são:

Linha 4 – Falta externa para o lado "P" correspondendo ao evento 12 (e12);

Linha 7 – Falta externa para o lado "D" correspondendo ao evento 12 (e3);

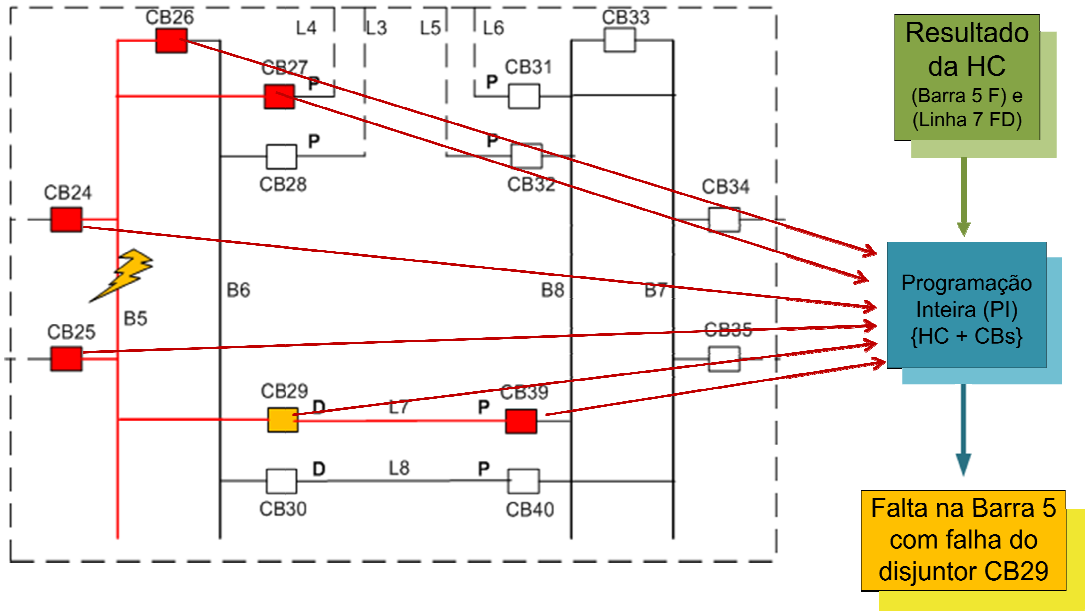
Transformador 5 – não falta (NF);

Transformador 6 – Não falta (NF).

Barra 6 – não falta (NF);

Demais equipamentos – Não falta (NF).

Na sequência é realizado a Análise em Nível de Sistema (ANS), com a atuação da Programação Inteira (PI), como mostra a ilustração a seguir. Assim, as informações com as respostas da HC juntamente com as informações dos disjuntores de todos os equipamentos do sistema, ativam a PI que fornece resposta indicando a falta na barra 5 com falha do disjuntor CB29.



Para melhor exemplificar, segue uma matriz base de dados para a programação inteira (PI) composta por quatro eventos e três alarmes.

$$M = \begin{array}{c} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} a_1 & a_2 & a_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

A Função Objetivo (FO) para a programação inteira (PI) é da por:

$$Min\ W1(s_1+s_2+s_3)\ +\ W2(f_1+f_2+f_3)\ +\ W3(e_1+e_2+e_3+e_4)$$

Sujeito a:

$$s_1 + e_1 + e_3 \geq a_1$$

$$s_2 + e_2 + e_3 \geq a_2$$

$$s_3 + e_4 \geq a_3$$

$$e_1 \leq a_1 + f_1$$

$$e_2 \leq a_2 + f_2$$

$$e_3 \leq a_1 + f_1$$

$$e_3 \leq a_2 + f_2$$

$$e_4 \leq a_3 + f_3$$

Se considerarmos que todos os alarmes são recebidos, ou seja, $a_1 = a_2 = a_3 = 1$, o conjunto de soluções possíveis é dado por:

$$e_3 + e_4 = 1$$

$$e_1 + e_2 + e_4 = 1$$

Como base nestas informações, nos alarmes recebidos (a2 e a3), analisando o evento três (e3) como resposta, e considerando as restrições com relação aos alarmes falsos e aos alarmes falhos temos:

$$A_{recebidos} = [0 \quad 1 \quad 1]$$

$$e_3 = [1 \quad 1 \quad 0]$$

Alarmes falsos:

Matriz base de dados:

$$M = \begin{array}{c} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} a_1 & a_2 & a_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Dadas restrições:

$$s_1 + e_1 + e_3 \geq a_1$$

$$s_2 + e_2 + e_3 \geq a_2$$

$$s_3 + e_4 \geq a_3$$

Substituindo por valores binários temos:

$$s_1 + 0 + 1 \geq 0$$

$$s_2 + 0 + 1 \geq 1$$

$$s_3 + 0 \geq 1$$

Para que as restrições sejam atendidas é necessário que S_3 seja igual a 1, ou seja a resposta apresente ao menos um alarme falso.

Alarmes falhos:

Matriz base de dados:

$$M = \begin{array}{c} \\ e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} a_1 & a_2 & a_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Dadas restrições:

$$e_1 \leq a_1 + f_1$$

$$e_2 \leq a_2 + f_2$$

$$e_3 \leq a_1 + f_1$$

$$e_3 \leq a_2 + f_2$$

$$e_4 \leq a_3 + f_3$$

Substituindo por valores binários temos:

$$0 \leq 0 + f_1$$

$$0 \leq 1 + f_2$$

$$1 \leq 0 + f_1$$

$$1 \leq 1 + f_2$$

$$0 \leq 1 + f_3$$

Para que as restrições sejam atendidas é necessário que f_1 seja igual a 1, ou seja a resposta apresente ao menos um alarme falho.

Com base nas explicações acima, pode-se verificar que a Programação Inteira (PI) obtém como resposta uma falta na barra 5 com falha do disjuntor CB29, como pode ser observado na tabela a seguir.

Equipamento	Diagnóstico	Conjunto de Alarmes esperados
BARRA B5	FALHA CB29	CB24, CB25, CB26, CB27, CB39, B1NF, B2NF, B3NF, B4NF, B5F, B6NF, B7NF, B8NF, A1NF, A2NF,A3NF, A4NF, L1NF, L2NF, L3FD, L4FD, L4NF, L5NF, L6NF, L7FD, L8FD, T1NF, T2NF,T3NF,T4NF, T5FP, T6FP, T7NF, T8NF