

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RONNIE SANTIAGO LOUREIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA BASEADO EM REDUNDÂNCIA
ANALÍTICA E REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS PARA RECUPERAÇÃO DE
FALHAS NA INSTRUMENTAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA**

São Luís

2012

RONNIE SANTIAGO LOUREIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA BASEADO EM REDUNDÂNCIA
ANALÍTICA E REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS PARA RECUPERAÇÃO DE
FALHAS NA INSTRUMENTAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMA (área de concentração: Engenharia de Automação e Controle) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto.

São Luís

2012

Loureiro, Ronnie Santiago.

Desenvolvimento de um sistema baseado em redundância analítica e redes neurais artificiais... / Ronnie Santiago Loureiro – São Luís, 2012.

127 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: João Viana da Fonseca Neto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

1. Relés digitais. 2. Redundância analítica. 3. Rede neural artificial - detecção e diagnóstico de falhas. I. Título.

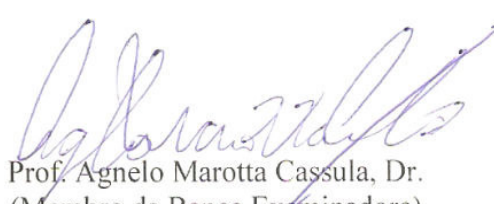
CDU 621.316.93

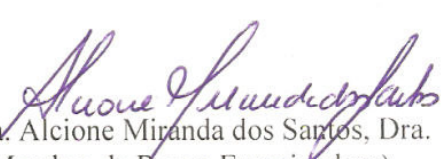
**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA BASEADO EM
REDUNDÂNCIA ANALÍTICA E REDES NEURONAIS
ARTIFICIAIS PARA RECUPERAÇÃO DE FALHAS
NA INSTRUMENTAÇÃO DE SUBESTAÇÕES
DE ENERGIA ELÉTRICA**

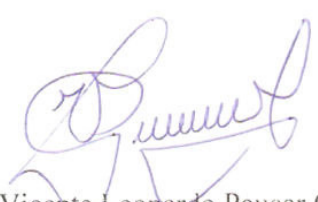
Ronnie Santiago Loureiro

Dissertação aprovada em 31 de agosto de 2012.


Prof. João Viana da Fonseca Neto, Dr.
(Orientador)


Prof. Agnelo Marotta Cassula, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)


Profa. Alcione Miranda dos Santos, Dra.
(Membro da Banca Examinadora)


Prof. Vicente Leonardo Paucar Casas, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)

Dedico esta dissertação de mestrado a minha esposa Andréa Carvalho, por ter me ajudado a persistir neste desafio e meu filho Lucas Carvalho que está orgulhoso pelo título de mestre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por ter me permitido realizar este trabalho de forma simples e criativa.

À Andréa Cristina de Carvalho Lima Santiago pela dedicação, paciência e, sobretudo, companheirismo durante a realização deste trabalho. O caminho seria muito mais difícil sem seus conselhos.

Ao Lucas Carvalho Gaia pela minha ausência de pai enquanto elaborava este trabalho. Fica o exemplo de dedicação e persistência na conquista de desafios.

Ao Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto pela orientação, amizade e confiança depositada para realização deste trabalho.

Aos meus pais, por terem me propiciado uma boa educação, permitindo a minha formação intelectual.

Aos amigos Diogo Nina e João Marcos que me acompanharam nesta jornada e ainda estão presentes.

Aos professores, alunos e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que sempre estiveram dispostos a colaborar.

“Conhecimento sem transformação não é sabedoria”

Paulo Coelho

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo monitorar e analisar os dados provenientes do sistema de instrumentação de uma subestação como forma de identificar falsos alarmes, que pode acarretar em uma tomada de decisão equivocada por parte da manutenção e operação. Este projeto foi concebido devido à necessidade de um projeto de pesquisa e desenvolvimento que se intitula Centro de Gestão da Manutenção (CGM) cujo objetivo global é auxiliar a manutenção na intervenção operacional de seus equipamentos. Os dados são extraídos do sistema de automação provenientes dos relés digitais que tem função de proteção e medição da rede elétrica, passando por uma sequência de transformação dos dados até chegar aos resultados, que servirá para detecção e diagnóstico de falhas. Foram aplicados métodos baseados no modelo quantitativo através da transformação dos dados do sistema de variáveis contínuas (SVC) e qualitativo através da transformação dos dados do sistema de eventos discretos (SED) aplicando técnicas de redundância analítica e redes neurais respectivamente, objetivando assim um modelo simplificado para detecção e diagnóstico da falha (DDF). O modelo foi concebido levando em consideração as características DDF decorrente de suas etapas, propiciando assim um bom sistema de recuperação de falha. Saber filtrar se determinado evento é real ou um falso alarme não é uma tarefa fácil, porém este sistema terá que atender este propósito. Foram utilizados recursos tecnológicos bastante consolidados no processo industrial para garantir a integração da solução, pois o fator tempo e o processamento da informação são decisivos nos resultados gerados pelo sistema de recuperação. Outro ponto fundamental neste trabalho foi ter desenvolvido um sistema baseado no conhecimento experimental, pois se tem maior robustez nos resultados.

Palavras-chave: Relés Digitais, Redundância Analítica, Rede Neural Artificial e detecção e diagnóstico de falhas.

ABSTRACT

This work aims to monitor and analyze the data from the instrumentation system of a substation as a way to identify false alarms, which can result in a decision by the mistaken maintenance and operation. This project was conceived because of the need for a research and development project which is called Maintenance Management Center (MMC) whose overall objective is to assist in the maintenance of their equipment operational intervention. Data is extracted from the automation system that has digital relay protection function and measurement of the electric grid, passing through a sequence of data processing to achieve the results that will serve for the detection and diagnosis of faults. We applied methods based on quantitative model by transforming the data system of continuous variables (SVC) and qualitative data by transforming the system of discrete event (SDE) applying analytical redundancy techniques and neural networks respectively, thus aiming a simplified model for detection and diagnosis fault (DDF). The model has been designed taking into account the characteristics DDF due to its stages, thereby providing a good system failure recovery. Know filter if certain event is real or a false alarm is not an easy task, but this system will have to meet this purpose. Technological resources are used fairly consolidated in the industrial process for the integration of the solution, because the time factor and information processing are critical in the results generated by the system recovery. Another key point of this trial was to have developed a system based on experiential knowledge, because it has higher robustness in results.

Key-words: *Digital Relay, Analytical Redundancy, Artificial Neural Networks, Fault Detection and Diagnosis.*

LISTA DE FIGURAS

2.1	Processo de Supervisão e Controle	23
2.2	Pirâmide da Automação de Subestação	25
2.3	Requisitos de Tempo das Funções Locais	28
2.4	Curva de Carga do Transformador	29
2.5	Diagrama de Seleção dos Tipos de Manutenção	32
3.1	Mapa de Conceitos Relacionados à Falhas e Falhas	37
3.2	Etapas de um Sistema DDF em Funcionamento	39
3.3	Transformações Dentro de Sistema de Diagnóstico	42
3.4	Esquema de um Sistema Redundante Analítico	49
3.5	Representação do Sistema Dinâmico	50
3.6	Representação da Dinâmica do Sistema Livre de Falhas	51
3.7	Vetor de Falhas e Gráfico onde Ocorreu uma Falha em $t = 2$	52
3.8	Verificação do Sinal $Y(t)$ entre os Limites	53
3.9	Esquema de Blocos Representando o Método de Detecção de Falhas por Equação de Paridade	54
3.10	Representação da Detecção de Falhas por Análise de Sinais	55
3.11	Esquema de Detecção de Falhas Baseado em Modelos	56
3.12	Modelo Não-Linear de um Neurônio	58
3.13	Exemplos de Funções de Ativação	59
3.14	Exemplo de Arquitetura de uma Rede MLP	60
3.15	Arquitetura da RNA Proposta no Trabalho	63
4.1	Diagrama Unifilar Subestação Maracanã - CEMAR	69
4.2	Arquitetura de Comunicação da Automação - SE MAR	69
4.3	Arquitetura da Automação para Sistema de Diagnóstico	70
4.4	Diagrama de Comunicação entre Servidor e Cliente	70
4.5	Diagrama dos Modelos para Recuperação de Falha no Nível I	71
4.6	Pontos de Informação do Transformador no Relé	72
4.7	Modelo Simplificado do Processo	73
5.1	Resultado do treinamento da RNA	88
5.2	Sistema de Recuperação de Falha	89
5.3	Módulo de Sinalização e Medição	90
5.4	Módulo de Comunicação do Processo	90

5.5	Módulo de Registro e Armazenamento	91
5.6	Módulo RNA	91
5.7	Módulo RA	92
5.8	Módulo Recuperação de Falha	92
5.9	Resultado do Caso1	94
5.10	Resultado do Sinóptico do Caso 2	95
5.11	Resultado do Sinóptico do Caso 3	96
5.12	Resultado do Sinóptico do Caso 4	97
5.13	Resultado do Sinóptico do Caso 5	98
5.14	Resultado do Sinóptico do Caso 6	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Correlação da Classe com sua Prioridade	83
Tabela 5.1 - Resumo das Regras do Conjunto de Treinamento	85
Tabela 5.2 - Avaliação da Arquitetura RNA	86
Tabela 5.3 - Parâmetros do Treinamento por Retropropagação do Erro no MLP	87
Tabela 5.4 - Identificação das cores do led	90
Tabela 5.5 - Sistema de Recuperação do Caso 2	95
Tabela 5.6 - Sistema de Recuperação do Caso 3	96
Tabela 5.7 - Sistema de Recuperação do Caso 4	97
Tabela 5.8 - Sistema de Recuperação do Caso 5	99
Tabela 5.9 - Sistema de Recuperação do Caso 6	100
Tabela 5.10 - Resultado do Sistema de Recuperação da Falha	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEMAR - Companhia Energética do Maranhão.
CGM - Centro de Gestão da Manutenção.
CME - Central de Monitoramento de Equipamentos.
COS - Centro de Operação do Sistema.
COI - Centro de Operação Integrado.
CSC - Centro de Supervisão e Controle.
DDF - Detecção e Diagnóstico de Falhas.
DNP3 - *Distributed Network Protocol* versão 3.
FT - Fator de transformação.
FDI - *Fault Detection and Isolation*.
FFT - *Fast Fourier Transform*.
IED - *Intelligent Electronic Device*.
ICF - Identificação e Correção da Falha.
IHM - Interface Homem-Máquina.
KV - Kilo Volt.
LAN - *Local Area Network*.
LabVIEW® - *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*
MAR - Maracanã.
MATLAB® - *Matrix Laboratory*
MLP - Perceptron de Múltiplas Camadas (*Multilayer Perceptron*).
MTBF - *Mean Time Between Failure*.
MVA - Mega Volt-Amperes.
OPC - Ole for Process.
OPLAT - Ondas Portadoras por Linhas de Alta Tensão.
PCA - Análise dos Componentes Principais.
PLS - Projeção por Estruturas Latentes.
RA - Redundância Analítica.
REF - Referência a Terra.
RNA - Redes Neurais Artificiais.
RTU - *Remote Terminal Unit*.
SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*.
SE - Subestação

SED - Sistema de Estado Discreto.

SEL - *Scheiweitzer Engineering Laboratories*.

SEP - Sistemas Elétricos de Potência.

SSC - Sistema de Supervisão e Controle.

SVC - Sistema de Variáveis Contínuas.

Trafo - Transformador.

TAR - Target.

TC - Transformador de Corrente.

UAC - Unidade de Aquisição de Dados e Comandos.

UTR - Unidade Terminal Remota.

WAN - *Wide Area Network*.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	18
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.3	OBJETIVOS	20
1.4	ORGANIZAÇÃO	21
2	AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÃO E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO	22
2.1	SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE	22
2.2	PROCESSO DE OPERAÇÃO EM TEMPO REAL	25
2.2.1	Dispositivo Eletrônico Inteligente - IED	26
2.3	AUTOMAÇÃO DA MANUTENÇÃO	29
2.3.1	Importância da Manutenção nas Fases do Projeto	30
2.3.2	Engenharia de Manutenção	31
2.4	PROCESSO DE MANUTENÇÃO	33
3	MODELOS PARA RECUPERAÇÃO DE FALHAS EM SUBESTAÇÕES	34
3.1	ESTADOS DO SISTEMA	34
3.1.1	Vetores de Variáveis Contínuas	35
3.1.2	Vetores de Estado Discreto	35
3.1.3	Transição de Estado	35
3.1.4	Matriz Transição de Eventos	36
3.2	DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DA FALHA	36
3.2.1	Tipos de Falhas	37
3.2.2	Etapas do Processo de Detecção e Diagnóstico de Falhas	39
3.3	CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS	39
3.4	TRANSFORMAÇÃO DAS MEDIDAS EM UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO	41
3.5	MÉTODOS PARA DETECTAR FALHAS	44
3.5.1	Métodos Baseados em Modelos Quantitativos	45
3.5.2	Métodos Baseados em Modelos Qualitativos	45
3.5.3	Métodos Baseados na História do Processo	46
3.6	MODELO QUANTITATIVO	47
3.6.1	Redundância de Hardware	47
3.6.2	Redundância Analítica	48
3.6.3	Geração Residual em Sistemas Dinâmicos	49

3.7	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALHAS.....	52
3.7.1	Detecção de Faltas com Verificação de Limites	52
3.7.2	Detecção de Falhas com Equações de Paridade	54
3.7.3	Detecção de Faltas por Meio da Análise da Assinatura de Sinais	54
3.7.4	Modelos de Processos e Modelagem das Falhas	55
3.8	MODELO QUALITATIVO	56
3.8.1	Rede Neural Artificial	57
3.8.2	Perceptron de Múltiplas Camadas	59
3.8.3	Algoritmo MLP com Treinamento por Retropropagação do Erro	63
4	CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA PARA DETECÇÃO DE FALHA PARA MANUTENÇÃO DETECTIVA	68
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	68
4.2	MODELAGEM DA INFORMAÇÃO	68
4.3	MODELOS DE PROCESSOS	72
4.3.1	Transformação das Medidas Quantitativas	73
4.3.2	Transformação das Medidas Qualitativas	80
5	PROJETO E EXPERIMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DE FALHAS	84
5.1	PROJETO	85
5.1.1	Projeto da RNA	85
5.1.2	Experimentos da RNA	87
5.2	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE FALHA	88
5.1.2	Experimentos do sistema de recuperação de falha	93
5.3	RESUMO DOS EXPERIMENTOS	100
6	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS	
	ANEXOS	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o rápido avanço tecnológico mundial devido à necessidade de se produzir mais em menos tempo e custo adequado na busca de atingir um produto de alto nível de qualidade e segurança, surgem máquinas modernas controladas por equipamento inteligente o qual verifica o funcionamento de uma planta qualquer por meio de rotinas configuradas com parametrização específica. Este sistema é chamado de processo automatizado, ou simplesmente automação (VENKATASUBRAMANIN, et al., 2003).

A Automação de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tem evoluído significativamente a cada ano. Este fato decorre de diversas razões, dentre as quais a necessidade de novas estratégias de controle dos sistemas elétricos (PEREIRA, 1998). Esta estratégia busca melhoria da qualidade do processo focado na quantidade mínima de interrupções e no tempo de restabelecimento.

O processo de digitalização ocorrido na subestação vem tornando o sistema mais confiável, flexível e susceptível a estudos para melhor compreender e diagnosticar as variáveis pertinentes (corrente, tensão, potência,...).

Os equipamentos a serem automatizados na subestação são: disjuntores, religadores, chaves seccionadoras, transformadores, bancos de capacitores, etc. Normalmente, cada um desses equipamentos possui um IED (*Intelligent Electronic Device*) associado, executando a princípio, funções de proteção e medição (FERREIRA, 2005).

O IED do setor elétrico também chamado de relé digital supervisiona e comanda os equipamentos da subestação, monitoram variáveis discretas – eventos do equipamento, se e quais proteções atuaram e variáveis analógicas – medições em geral (correntes, tensões, potências, etc).

Todas as informações oriundas das subestações são canalizadas e centralizadas no sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Esta tecnologia disponibiliza ao usuário coletar dados de um ou mais equipamentos distantes e enviar instruções de controle limitadas a estes equipamentos (MARTINS, 2003).

Do ponto de vista da automação da subestação, a tecnologia SCADA torna desnecessário o operador estar fisicamente próximo aos equipamentos, pois permite que eles trabalhem em um centro de controle e, mesmo distantes, monitorem e controlem processos distribuídos em locais remotos.

As concessionárias de energias elétricas ou empresas do setor de energia, ao automatizarem o seu parque de subestações, deixam-nas desassistidas, ou seja, não são mais necessários operadores trabalhando em turno. Todas as informações importantes e os controles dos equipamentos ficam disponíveis 24 horas no centro de operação do sistema (COS), sendo assim, operados remotamente.

Com o advento da digitalização, cada vez mais cresce a necessidade de garantir segurança e confiabilidade dos equipamentos que são utilizados na execução dos processos. É crescente a busca pela minimização das perdas econômicas causadas durante os processos de produção. Entre outras exigências, deseja-se que os componentes inclusos nos processos de produção tenham um bom desempenho e sejam livres de falhas. Todo sistema, de qualquer área, seja elétrico, químico, hidráulico, mecânico ou térmico, estão sujeitos a falhas. Eventuais falhas podem acarretar perdas de desempenho não aceitáveis, bem como pôr em risco os equipamentos e o pessoal envolvido (VENKATASUBRAMANIN, et al., 2003).

Dessa forma, o ideal é que as falhas possam ser detectadas, isoladas e toleradas, proporcionando uma melhor confiabilidade do sistema. Detectar uma falha no sistema significa dizer se ela está ocorrendo ou não. Já isolar, significa classificar qual o tipo da falha, por exemplo, informar em que componente do sistema ela aconteceu, e a tolerância da falha pode ser definida como ações apropriadas que devem ser tomadas para minimizar o seu efeito. Em outras palavras, um sistema que possui um comportamento tolerante a falhas deve ser capaz de detectar e classificar automaticamente as falhas ocorridas, bem como ser capaz de continuar funcionando após as suas ocorrências. Todo este processo pode ser também definido como Detecção e Diagnóstico de Falhas (DDF) (RAPHAELA, 2006).

1.1 MOTIVAÇÃO

Manter o funcionamento contínuo do sistema é um dos grandes desafios que o planejamento estratégico da manutenção tem para cumprir, pois cabe a decisão de quando intervir no sistema. Medidas preventivas são tomadas com base na documentação fornecidas pelo fabricante e, no histórico corporativo da manutenção, mantendo assim um ciclo periódico de inspeção para detectar alguma anomalia.

Dos equipamentos instalados na subestação, o transformador tem um destaque especial por se tratar de um elemento responsável pela operacionalidade, isto é, sem ele não tem como funcionar a subestação. Medidas estratégicas são tomadas para evitar danos ao transformador, mas mesmo assim, este não está isento de avarias.

A manutenção preventiva deste equipamento se faz pela análise do óleo mineral isolante cuja periodicidade se faz anualmente. Este teste, por não ser completo, faz-se necessários vários ensaios para detectar anomalias. Para realizar estes ensaios tem-se um custo relativo, uma logística complexa e uma demanda de tempo considerável para execução da atividade.

Medidas corretivas têm usado a subestação móvel com a finalidade de poderem ser conectadas ao sistema em um curto espaço de tempo evitando a indisponibilidade do fornecimento de energia elétrica. Sua utilização se torna ainda mais importante ao assegurar, rapidamente, a reposição dos serviços de energia em emergências, tais como incêndios ou inundações, ou repondo centros vitais, tais como áreas de conservação de alimentos, produtos medicinais, hospitais, etc. Outra aplicação comum para subestações móveis é a execução de reparos e manutenção preventiva em transformadores de potência das subestações, sem a necessidade de interrupção do fornecimento de energia elétrica. Mas nem sempre estão disponíveis no momento onde ocorreu a falha.

Diante de várias variáveis para tomar decisão, quais são as mais pertinentes e impactantes no processo de gerenciamento de energia. Para tomar a melhor decisão, tem-se que ter garantir a confiabilidade nos parâmetros elétricos primários, pois é onde se fundamenta as respostas concretas do processo. Para tanto, precisa-

se de uma alta confiabilidade na instrumentação, pois é nela que se sinalizam os sintomas da planta.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A energia elétrica é fundamental para pequenas, médias e grandes empresas, pois todas as utilizam, por exemplo, em suas máquinas, refrigeração, computadores e iluminação. Portanto, a energia elétrica deve ser fornecida com qualidade e segurança, tanto para as pessoas quanto para os equipamentos (CAMINHA, 2004).

Uma das grandes preocupações do setor elétrico nos dias de hoje, é a utilização da energia elétrica de forma cada vez mais racional e otimizada, reconhecendo-se a dificuldade que o setor enfrenta para expandir a oferta de energia, uma vez que os recursos financeiros são limitados. Surge, portanto, a necessidade de se utilizar alternativas que contemplem o aproveitamento ótimo de equipamentos que perfazem parte do sistema elétrico, seja em nível de geração, transmissão ou distribuição de energia.

O SEP exige alto investimento, pois geralmente é complexo e, portanto, necessitam de mão de obra especializada para sua instalação, operação e manutenção.

O transformador de potência representa o equipamento de maior importância estratégica e de maior investimento. A ocorrência de uma falha que venha a retirar um transformador de serviço para evitar danos maiores ao equipamento poderá causar problemas de ordem política, econômica e financeira, já que afetará a estabilidade e a confiabilidade do sistema, podendo deixar importantes cargas inoperantes, além do pagamento de pesadas multas por parte da empresa responsável pelo equipamento faltoso. A acentuada dependência energética mundial aliada à escassez de recursos das fontes de energia à falta de investimento e à falta de uma política adequada de desregulamentação do setor só agrava este quadro.

Os equipamentos devem ser constantemente monitorados para a conservação e eficiência do mesmo. Equipamentos de proteção como fusíveis, relés e disjuntores são constantemente utilizados para proteção de equipamentos maiores e bem mais caros, e que na maioria das vezes, o seu funcionamento constante e

ininterrupto é fundamental. Apesar de todas essas proteções, na maioria dos casos não existe um diagnóstico preciso de detecção e correção da falha, deixando o equipamento inoperante até localizar e corrigir a falha.

Concessionárias de energia elétrica estão substituindo antigos equipamentos de proteção eletromecânicos por dispositivo eletrônico inteligente para detectar e diagnosticar falhas que ocorrem ao longo de sua planta. E quando a falha é proveniente dos equipamentos: sensores, atuadores e IEDs. Como identificar se aquele evento é alguma perturbação na planta ou algum defeito nos dispositivos eletrônicos. A incerteza do evento pode nos levar a conclusões totalmente distantes da causa raiz da falha deixando parte do sistema inoperante e sobrecarregando a outra parte, além da mobilização logística de equipamentos e corpo técnico da manutenção.

Uma alternativa para minimização dos efeitos desagradáveis causados pelas falhas é a utilização da chamada redundância. Entretanto, muitas vezes essa é uma alternativa bastante custosa e pode se tornar inviável, como por exemplo, no caso de falta de espaço físico para instalação do componente redundante (VENKATASUBRAMANIN, et al., 2003).

Os modelos para detecção e diagnósticos de falhas utilizados hoje envolvem a detecção rápida de um evento anormal, diagnosticando sua causa e origem, e então tomar ou sugerir a devida decisão ao controle supervisor, realizando ações para que o processo volte ao seu estado normal, seguro e operacional.

Atualmente, o processamento da informação é realizado pelos especialistas (Gestores, Engenheiros e Técnicos) sem o auxílio de métodos, técnicas e ferramentas inteligentes a decisão. Desta maneira, tem-se uma primeira justificativa, espera-se minimizar o erro devido às decisões baseadas somente na experiência do especialista. Desta forma, têm-se os meios físicos que permitem estabelecer uma política ótima de manutenção.

1.3 OBJETIVOS

Em termos científicos, o principal objetivo desta dissertação é propor e analisar o desempenho de técnicas de redundância analítica e redes neurais

aplicadas em métodos baseado em modelos quantitativos e qualitativos de sistemas de detecção e diagnóstico de falhas.

Em termos tecnológicos, o objetivo desse trabalho é contribuir para a área de detecção e diagnóstico de falhas na instrumentação de subestações, buscando minimizar os erros proveniente da instrumentação ou tomada de decisão. Esta, por sua vez, trará benefícios que podem vir a auxiliar nas tomadas de decisão operacionais nos parques elétricos.

1.4 ORGANIZAÇÃO

Os próximos capítulos desta dissertação contêm todos os conceitos e definições teóricos voltados para o estado da arte, almejando o entendimento da pesquisa e contribuindo para mundo científico acadêmico e profissional. No Capítulo 2, será apresentada toda filosofia conceitual do processo de automação em subestação para compreender suas fundamentações e propor soluções que atenda as necessidades deste projeto. A teoria sobre métodos baseados nos modelos quantitativos e qualitativos encontram-se no Capítulo 3. Também neste capítulo está inserida a teoria de redundância analítica e Redes Neurais Artificiais nos respectivos métodos. No Capítulo 4, é dado um enfoque detalhado sobre a contribuição científica do assunto exposto nos capítulos anteriores. O Capítulo 5 está os resultados obtidos tanto de simulações quanto em situações reais. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e perspectivas futuras para o trabalho. Por fim, as referências bibliográficas utilizadas como base de estudo para o desenvolvimento do trabalho. Os anexos deste trabalho estão como forma de complementar à aplicação.

CAPÍTULO 2

AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÃO E ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

As exigências cada vez maiores dos consumidores na qualidade da energia elétrica fornecida, aliadas a uma contínua necessidade de melhoria dos indicadores de qualidade como mais um aspecto relevante da eficiência das empresas distribuidoras de energia elétrica tem conduzido à automação da operação de sistemas elétricos.

Essa necessidade, aliada à evolução tecnológica de *hardware* e *software* que tornou os sistemas de automação confiáveis, robustos e com custo acessível, permitiu a utilização de tecnologia de ponta nos processos operacionais de energia elétrica. A digitalização das subestações é umas dessas tecnologias de ponta com ótimo impacto na melhoria dos indicadores de qualidade.

2.1 SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLE

O Sistema de Supervisão e Controle (SSC) é constituído por um conjunto de equipamentos, hardware e software, que está conectado ao SEP por meio de equipamentos de medição, proteção, controle e telecomunicações, possibilitando a supervisão e o controle à distância. Essa supervisão é possível através da aquisição de pontos de entrada (analógicos e digitais) e do controle de pontos de saída (comando em equipamentos do SEP).

Para possibilitar a implantação e manutenção do SSC é indispensável considerar como elemento integrante às equipes de pessoas, que devem ser constituídas com integrantes com formação multidisciplinar especializada em diferentes áreas (banco de dados, arquitetura de hardware, comunicação de dados, sistemas elétricos, ferramentas computacionais, etc).

Um SSC eletrônico pode utilizar tecnologia analógica (transistores, amplificadores discretos ou integrados, amplificadores operacionais, etc), ou tecnologia digital (atualmente, por meio de microprocessadores digitais). Os SSC são também chamados de “telecontrole”, quando a ação de controle e supervisão é realizada à distância.

O sistema de telesupervisão e telecontrole depende de sistemas de telecomunicação. Estes podem utilizar rádio-comunicação, linha física ou cabo óptico, sistema *carrier* ou comunicação via satélite. Podem ser privativos ou passar por uma central de telefonia (linha comutada). O canal de comunicação pode ainda ser dedicado ou compartilhado, ou seja, num mesmo canal podem trafegar informações de controle (dados) e informação de voz ou tons de teleproteção, por exemplo.

A Figura 2.1 apresenta um processo de supervisão e controle à distância, no qual se destacam quatro estruturas básicas distintas, a saber:

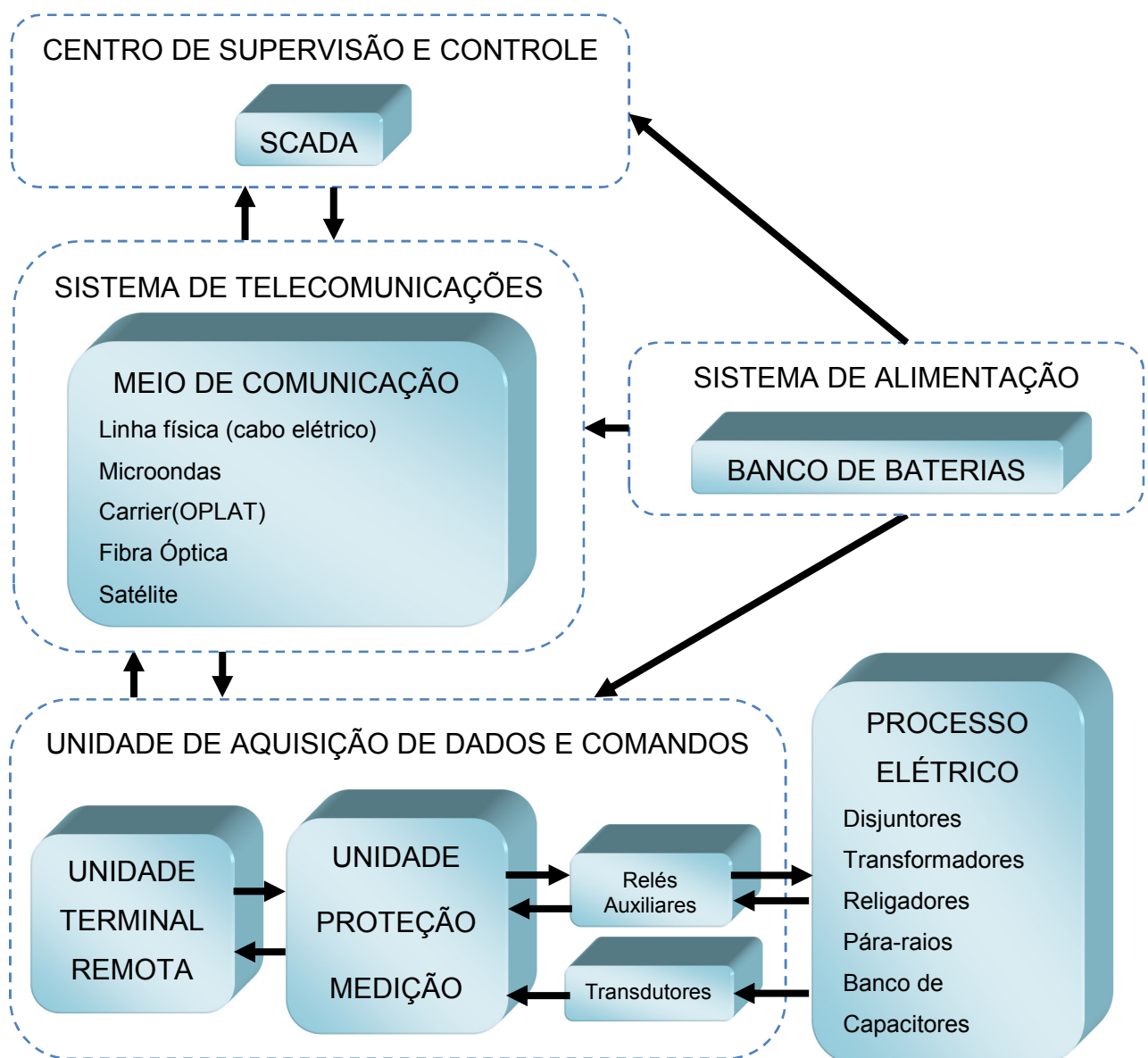


Figura 2.1 – Processo de Supervisão e Controle

- (i) - **Centro de Supervisão e Controle (CSC)**, também denominado Centro de Controle, Centro de Operação Integrado (COI) ou Centro Operação do Sistema (COS). Este centro é constituído por ambientes de hardware e software nos quais são armazenados os aplicativos de carácter sistêmico tais como: estimação de estado, análise de contingências, controle automático de geração etc. O Sistema de Supervisão e Controle é assim denominado em função do seu atributo básico que é exatamente a capacidade de realizar a supervisão (monitoramento “on-line” de um determinado processo, no caso o sistema elétrico, identificando os estados dos equipamentos e os valores das grandezas ou variáveis a ele concernentes) e o controle (atuação no processo de forma a alterar os valores das variáveis ou estados dos equipamentos, monitorando a reação do processo aos comandos efetuados).
- (ii) - **Unidade de Aquisição de Dados e Comandos (UAC)** ou Unidade de Interface com o Processo. Esta unidade é constituída por equipamentos responsáveis por fazer a interface adequada com o processo de modo a obter dados e efetuar comandos sobre o mesmo. A interface com o processo é feita por meio de transdutores (entradas/saídas analógicas) e relés auxiliares (entradas e saídas digitais).
- (iii) - **Sistema de Telecomunicações** ou Canal de Comunicação de Dados responsável por efetuar a transmissão de dados entre os equipamentos de aquisição de dados e controle e o CSC. Os meios de comunicação utilizados são os mais diversos tais como: fibra óptica, micro-ondas, ondas portadoras por linhas de alta tensão, satélite etc.
- (iv) - **Sistema de Alimentação** responsável pelo suprimento de energia nos casos de falha da alimentação da rede elétrica. Esse sistema deve ter autonomia suficiente para alimentar as cargas críticas quando da ocorrência de perturbações no sistema elétrico.

A Figura 2.2 apresenta a pirâmide da automação correlacionada ao setor elétrico, especificamente a subestação, que apresenta somente 3 níveis. O 1º e 2º níveis compreendem a UAC enquanto o 3º nível, CSC. Devido à distância física entre o nível 2 e 3, têm-se os diversos meios de comunicação para enlace de dados. Com a evolução da automação do setor elétrico através de projetos, trabalho e pesquisa para desenvolver ferramentas de melhoria contínua e gerenciamento da

planta, inicia-se o desenvolver de modelos para o nível 4 e 5. Ao término da proposta deste trabalho, a pirâmide da automação terá o 4º nível.

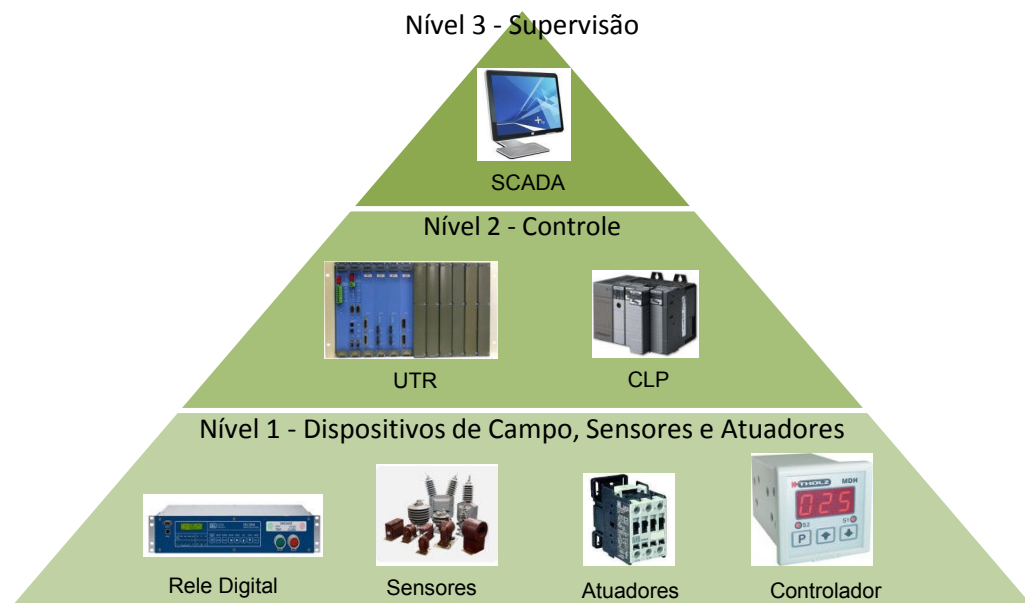


Figura 2.2 – Pirâmide da Automação de Subestação

2.2 PROCESSO DE OPERAÇÃO EM TEMPO REAL

O processo de operação do SEP consiste no monitoramento e supervisão de grandezas, elétricas e não elétricas do sistema, de modo a possibilitar uma análise que identifique a necessidade de se intervir no mesmo, por meio de ações de controle, que visam manter o sistema operando, dentro de padrões de qualidade e continuidade estabelecidos para o fornecimento de energia elétrica.

Para que a operação seja feita com sucesso é imprescindível obter um conjunto de informações, bem dimensionado e de qualidade, que possa garantir agilidade e precisão ao processo de tomada de decisão por parte do operador. O processo de operação pode ser dividido em duas etapas: operação **Sistêmica** e **Local**.

A sistêmica analisa o processo de forma integral. Supervisiona todas as principais grandezas de todas as subestações integrantes do SEP e efetua as correlações entre elas, de forma a manter o sistema elétrico dentro de uma condição

segura de operação. As principais funções que são exercidas neste nível da operação são:

- Monitoramento de Tensão e Carregamento.
- Controle da tensão dos barramentos.
- Recomposição do sistema elétrico.
- Bloqueio/desbloqueio de proteções.
- Acionamento das equipes de manutenção quando da identificação de falhas em equipamentos.

A operação sistêmica é realizada pelo COS. Conforme as necessidades operativas, através dos Sistemas de Supervisão e Controle, objetiva acompanhar, em tempo real, as principais grandezas elétricas do SEP, por meio dos processos de telemedição; por intermédio de processos de telecontrole, atuar nos equipamentos para abrir ou fechar disjuntores; modificar posição de *tap* de transformadores; atuar no sistema de proteção para bloquear e desbloquear.

Operação em nível local é realizada em complemento às ações definidas nos centros de operação. As principais funções executadas em nível local são:

- Seqüência de manobras para isolamento de equipamentos por meio de atuação em chaves seccionadoras.
- Disjuntor preso (falha de disjuntor).
- Intertravamento de manobra de chaves seccionadoras.
- Recomposição da subestação.

2.2.1 Dispositivo Eletrônico Inteligente - IED

A tecnologia digital torna possível utilizar um sistema para produzir todas as formas de informação, reproduzi-la com custos e perdas mínimas, providenciar o seu arquivo de configuração através do processo da reprodução e transmitir qualquer elemento que o constitui a qualquer utilizador de forma rápida e barata. No entanto, apesar de estas características tornarem a informação muito mais acessível, não constitui por si só um sistema desenvolvido de comunicação.

Os sistemas digitais ajudam a calcular, correlacionar, combinar e relacionar; aumentam as capacidades de escolher, ordenar, classificar e seleccionar, expandindo o poder de percepção. O computador torna mais fácil produzir,

reproduzir e transmitir o trabalho cultural, acelerando os ganhos intelectuais e abrindo o acesso cultural de forma sem precedentes. Aumenta tremendamente as capacidades humanas de seleção, memória, percepção e cálculo, ampliando a inteligência de cada um.

Dos elementos digitais que constitui a automação de subestação o relé digital é o dispositivo primordial e insubstituível.

Os relés digitais são dispositivos microprocessados projetados para atuar na casa dos milésimos de segundos recorrente as necessidades das funções de proteções, propiciando a integridade do sistema elétrico e dos equipamentos da subestação, tais como: disjuntores, transformadores, religadores e banco de capacitores.

Dentre as várias funções presentes podem ser citadas:

- Sinalização ou monitoramento de estado (status) de equipamentos.
- Medição.
- Proteções (linha, transformador, barra, reator, perda de sincronismo etc.).
- Monitoramento das proteções.
- Religamento automático.
- Estimativa de localização de falta na linha.
- Telecomando.
- Proteção por falha de disjuntor.
- Controle de equipamentos de chaveamento (intertravamento).
- Controle local de tensão e fluxo de reativo.
- Corte seletivo de cargas (*load shedding*).
- Sincronização.
- Alarmes.
- Indicação e registro de seqüência de eventos.
- Oscilografia.

Os sistemas de aquisição de dados têm requisitos diferentes quanto a tempos e velocidades de processamentos, dependendo das funções implementadas.

Na Figura 2.3, retirada de (JARDINI,1996), são mostradas, numa escala de tempo, funções locais e seus requisitos de tempo. Percebe-se que, dependendo do requisito de tempo, pode-se coletar o valor instantâneo ou valor eficaz da

variável, com maior ou menor velocidade, podendo implicar o uso de equipamentos dedicados para as funções mais rápidas. Pode-se identificar um conjunto de funções de regime permanente, tais como apresentação de medição e eventos e outras classificadas como rápidas, tais como: proteção, registro de eventos e oscilografias.

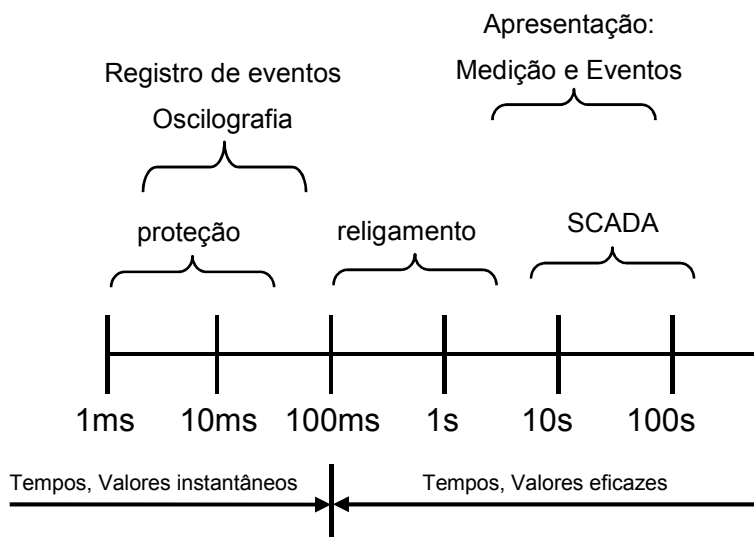


Figura 2.3 – Requisitos de Tempo das Funções Locais

Fonte: [JARDINI, 1996]

Com respeito às subestações e o desenvolvimento deste trabalho, é importante identificar as principais funções passíveis de serem automatizadas na subestação. São elas:

(i) - **Sobrecarga em Transformadores.**

Essa função realiza o monitoramento de carregamento dos transformadores por meio da comparação dos valores medidos periodicamente, de potência aparente ou corrente, com os valores de referência. O objetivo dessa função é efetuar um gerenciamento do carregamento do transformador de tal forma a preservar sua vida útil conforme especificação do fabricante.

A curva típica de carga de um transformador é mostrada na Figura 2.4, onde se percebe o comportamento do carregamento do transformador ao longo do dia. Verifica-se que esse equipamento é submetido a um carregamento maior na ponta de carga do sistema. Nesse intervalo de tempo (h_1, h_2), o transformador perde vida útil que quando operando com potência (aparente) nominal S , porém nos

demais períodos esta perda é menor. Se um fator compensar o outro, o transformador com carga variável terá a mesma perda de vida útil do que o transformador operando com carga constante. O valor S_p refere-se ao valor máximo de potência aparente que fluiu pelo transformador.

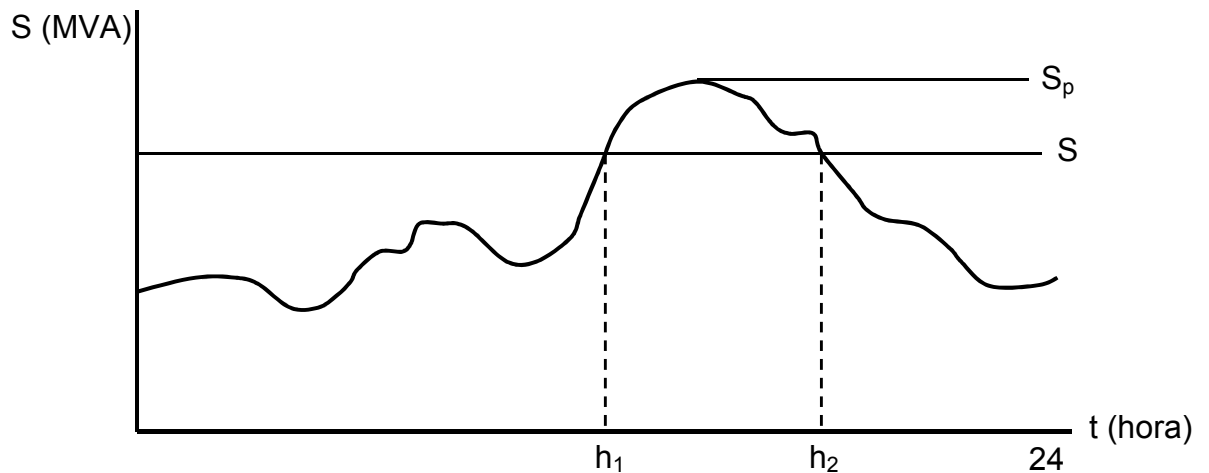


Figura 2.4 – Curva de Carga do Transformador

(ii) - Indicação e registro de seqüência de eventos.

Esta função permite que se registrem dados em memória não volátil, durante a ocorrência de anomalias (faltas). Esses dados são utilizados para uma análise seqüencial para interpretação do que ocorreu durante a perturbação.

As grandezas coletadas são selecionadas e associadas aos eventos que causam os seus registros. Diversos eventos podem ser registrados simultaneamente.

Podem-se selecionar somente as variáveis pertinentes que serão registradas e no qual gera oscilografia como forma de um maior detalhamento.

2.3 AUTOMAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Nos últimos 20 anos a atividade de manutenção tem passado por mais mudanças do que qualquer outra atividade.

Estas alterações são conseqüências de:

- Aumento, bastante rápido, do número e diversidade dos itens físicos (instalações, equipamentos e edificações) que têm que ser mantidos.
- Projetos muito mais complexos.
- Novas técnicas de manutenção.
- Novos enfoques sobre a organização da manutenção e suas responsabilidades.

Nas empresas vencedoras, o homem de manutenção tem reagido rápido a estas mudanças. Esta nova postura inclui uma crescente conscientização de quanto uma falha de equipamento afeta a segurança e o meio ambiente, maior conscientização da relação entre manutenção e qualidade do produto, maior pressão para se conseguir alta disponibilidade e confiabilidade da instalação, ao mesmo tempo em que se busca a redução de custos. Estas alterações estão exigindo novas atitudes e habilidades das pessoas da manutenção, desde gerentes, passando pelos engenheiros, supervisores, até chegar aos executantes (PATRIOTA, 2009).

2.3.1 Importância da Manutenção nas Fases do Projeto

Da correta realização de cada fase – projeto, fabricação, instalação, operação e manutenção – dependem a disponibilidade e a confiabilidade do sistema.

Na fase de projeto, o levantamento de necessidade, inclusive o envolvimento dos usuários (Operação e Manutenção), além dos dados específicos para sua elaboração, nível de detalhamento, dentre outros, são de fundamental importância, pois irão impactar diretamente nas demais fases, com conseqüências no desempenho e na economia. Como desempenho pode-se citar as questões ligadas à confiabilidade, produtividade, qualidade do produto final, segurança e preservação ambiental e as econômicas se referem ao nível de custo-eficiência obtido.

A escolha dos equipamentos deverá considerar a sua adequação ao projeto (correto dimensionamento), a capacidade inerente esperada (através de

dados técnicos, MTBF – tempo médio entre falhas), qualidade, manutenibilidade, além do custo-eficiência.

A fabricação deve ser devidamente acompanhada e incorporar os requisitos de modernidade e aumento da confiabilidade dos equipamentos, além das sugestões oriundas da prática de manutenção.

A fase de instalação deve prever cuidados com a qualidade da implementação do projeto e as técnicas utilizadas para esta finalidade. Quando a qualidade não é acompanhada, muitas vezes são inseridos pontos de falhas que se mantêm ocultos por vários períodos e vêm a se manifestar muitas vezes quando o sistema é fortemente solicitado, ou seja, quando o processo produtivo assim o exige, normalmente necessita-se de maior confiabilidade.

As fases de manutenção e operação terão por objetivo garantir a função dos equipamentos, sistemas e instalações no decorrer de sua vida útil e a não degeneração do desempenho. Nesta fase da existência, normalmente são detectadas as deficiências geradas no projeto, seleção de equipamentos e instalação.

A maneira pela qual é feita a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os vários tipos de manutenção existentes. Segundo [Kardec,1999] atualmente são definidos seis tipos de práticas básicas de manutenção que são:

- Manutenção Corretiva Não Planejada;
- Manutenção Corretiva Planejada;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva;
- Manutenção Detectiva;
- Engenharia de Manutenção;

Este trabalho foi focado na Manutenção Detectiva e em anexo tem as definições para os demais tipos de manutenção.

2.3.2 Engenharia de Manutenção

Engenharia de Manutenção é deixar de ficar consertando continuamente, para procurar as causas básicas, modificar situações permanentes de mau

desempenho, deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver a manutenibilidade, dar *feedback* ao projeto, interferir tecnicamente nas compras (KARDEC, 1999).

No momento em que a estrutura de manutenção dessa planta estiver utilizando para análises estudos e proposição de melhorias, todos os dados que o sistema de preditiva colhem e armazenam, estará praticando engenharia de manutenção. A engenharia de manutenção utiliza dados adquiridos pela manutenção, para melhorar sempre.

Para cada equipamento pode-se selecionar o tipo de manutenção adequada conforme Figura 2.5. Pode-se ter mais de um tipo de manutenção aplicada a um equipamento. A conceituação de cada tipo de manutenção está no anexo A que pode servir de consulta.

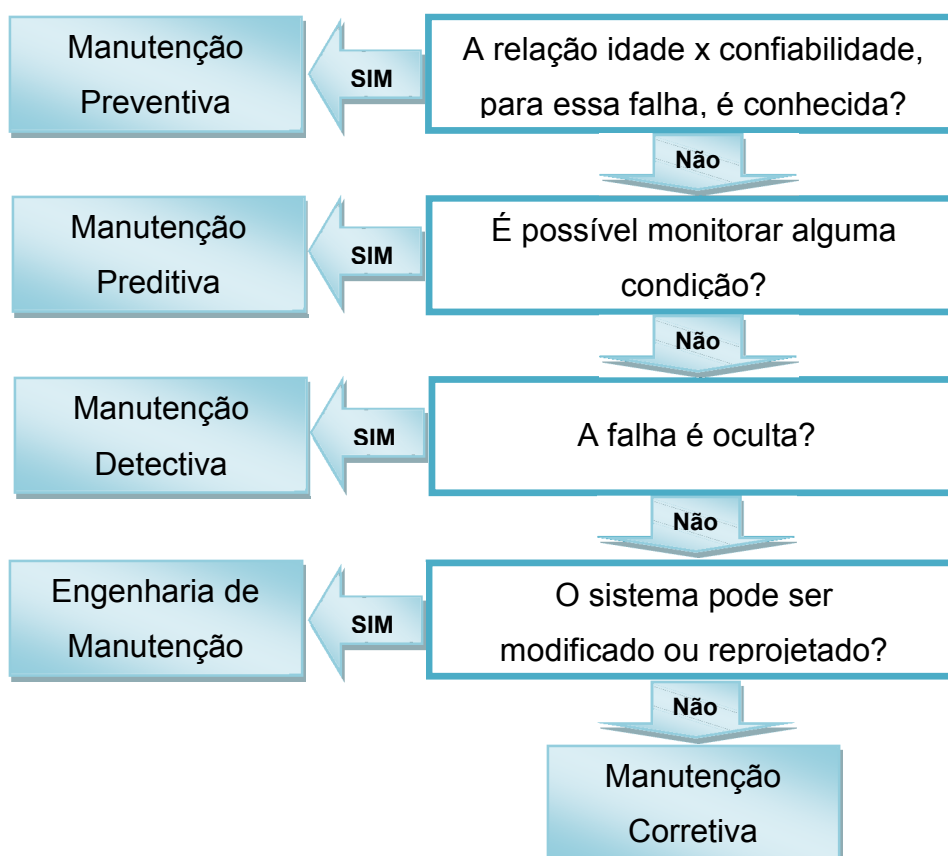


Figura 2.5 – Diagrama de Seleção dos Tipos de Manutenção

Fonte: [KARDEC, 1999]

2.4 PROCESSO DE MANUTENÇÃO

O processo de automação da manutenção visa monitorar os equipamentos do sistema elétrico, de forma mais detalhada ao processo de operação. Através do monitoramento de algumas grandezas elétricas podem ser identificadas falhas incipientes nos equipamentos.

A proposta da automação do processo de manutenção consiste em substituir as tradicionais manutenções corretivas e preventivas pela manutenção preditiva. A mudança de manutenções não planejadas para intervenções planejadas desperta grandes interesses em países de grandes dimensões com subestações isoladas, nas quais os deslocamentos significam parcela substancial do custo total da manutenção.

Nesse processo, identificam-se duas etapas básicas que são a coleta de dados e o tratamento das informações, de forma a possibilitar, via algoritmos, diagnosticar, em tempo real, o estado dos equipamentos em termos de disponibilidade e confiabilidade para a operação do sistema elétrico. A idéia é eliminar a possibilidade do pessoal de operação ser surpreendido com a falha intempestiva de equipamentos importantes do SEP.

Os investimentos feitos no monitoramento e diagnóstico de falhas de equipamentos permitem maximizar a disponibilidade dos equipamentos para o sistema elétrico, acarretando reduções significativas dos custos de manutenção. Além da redução dos custos de manutenção, obtém-se o aumento da confiabilidade da rede elétrica, um planejamento mais eficiente da manutenção e o prolongamento da vida útil dos equipamentos monitorados.

Outro aspecto importante decorre da necessidade de se saber rapidamente onde e quando ocorreu um problema. Como consequência direta da desregulamentação, as multas por interrupção do serviço passam a ter uma importância significativa. Desta forma, acessar dados em tempo real relacionado à hora e ao local da falha, e às condições do equipamento primário, é de altíssima importância na redução do tempo de interrupção no fornecimento de energia elétrica.

CAPÍTULO 3

MODELOS PARA RECUPERAÇÃO DE FALHAS EM SUBESTAÇÕES

Para um sistema de detecção e diagnóstico de falhas, nem toda informação que chega ao sistema é relevante, além de ruídos provocados pela rede de comunicação e sensores defeituosos. O sistema de detecção de falhas deve saber quando ocorre uma anormalidade no sistema, ou seja, quando um valor passado ao sistema está em desacordo com o padrão adotado. Ao constatar essa anormalidade no processo, um diagnóstico deverá ser feito e classificado, gerando uma lista de hipóteses que tentam explicar a anormalidade detectada. Um diagnóstico completo e classificativo deverá relacionar a falha atual com um subgrupo de um grupo de falhas propostas. A resolução de um diagnóstico classificativo deverá ter este subgrupo de falhas como o mínimo possível, ou seja, deverá isolar a falha para propor um diagnóstico confiável da origem da falha (VENKATASUBRAMANIN, et al., 2003).

Este capítulo será apresentado toda fundamentação teórica deste trabalho baseado em vários livros, artigos e projetos acadêmicos.

3.1 ESTADOS DO SISTEMA

Os estados dos sistemas fornecem o comportamento do sistema em um dado instante de tempo t_k . As variáveis de estado são de ordem qualitativa (discreta) e quantitativa (contínua). O vetor de estados é dado por

$$X = X_{SVC} \cup X_{SED} \quad (3.1)$$

sendo X_{SVC} o vetor do sistema de variáveis contínuas (SVC) que são utilizadas no modelo de falha que é baseado na teoria de observadores de estado. O vetor X_{SED} é o vetor do sistema de estado discreto (SED) que contém os dados de eventos dos relés.

3.1.1 Vetores de Variáveis Contínuas

Os vetores de variáveis contínuas detêm informação a respeito dos equipamentos da subestação para intervalos de amostragem que são sincronizados com a instrumentação em campo. Particularizando para grandezas elétricas ou outros tipos de informação.

As entradas do sistema para detecção de falhas são representadas pelo vetor X_{SVC} , que é dado por

$$X_{SVC} = \{x_i^{SVC}, status_i\} \quad (3.2)$$

sendo x_i^{SVC} a i-ésima componente do vetor de estado de variáveis contínuas e $status_i$ representa a variável (Módulo e Fase) no i-ésimo instante de tempo para uma dada condição de carga.

3.1.2 Vetores de Estado Discreto

Os vetores de estado discreto ou vetores de eventos detêm informação da monitoração do sistema de proteção do equipamento. Informação proveniente dos relés. A forma geral do vetor de eventos X_{SED} é dada por

$$X_{SED} = \{x_i^{SED}, status_i\} \quad (3.3)$$

sendo x_i^{SED} a i-ésima componente do vetor de estado discretas e $status_i$ representa o estado discreto no i-ésimo instante de tempo.

3.1.3 Transição de Estado

Os vetores de estado e eventos (x_i) são associados ao status operacional (representado pela matriz transição de eventos) em instantes de tempo t_k . O vetor de estado que contém a informação proveniente dos relés é dado por

$$x_i^k = \{x_{ij}^k, a_{ij}^{k+1}\} \quad j = 1, \dots, m ; i = 1, \dots, n ; k = 1, \dots, \infty \quad (3.4)$$

sendo x_{ij}^k o estado associado com um dado valor proveniente dos relés, o índice i representa o i -ésimo equipamento dos n equipamentos digitalizados na subestação. O índice j está associado ao estado j ou j -ésimo qualidade de um dado estado ou item de x_i . Os elementos a_{ij}^k estão associados aos j -ésimo valores de um dado estado do equipamento digitalizado no instante de tempo t_k .

3.1.4 Matriz Transição de Eventos

Os elementos da matriz de transição de eventos A_k capturam o comportamento dos elementos do transformador que estão sendo monitorados pelos relés, em termos de suas grandezas elétricas ou da ocorrência de eventos que são detectados pelo sistema de proteção. A matriz de eventos no instante t_k é dada por

$$A_k = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

3.2 DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DA FALHA

Nesta seção, conceitos e técnicas ligados ao processo de detecção e diagnóstico de falhas serão apresentados. Antes de explicar todo esse processo é importante conhecer alguns conceitos fundamentais utilizados nesta área, entre eles (WITCZAK, 2005):

- **Degradação:** provoca uma leve queda no desempenho do sistema, mas se mantida por um longo período, pode causar falhas severas. O desempenho global do sistema só será alterado caso a degradação atinja um nível crítico;

- **Falha:** representa uma propriedade inaceitável do sistema ou de algum componente. Em geral, todos os defeitos são falhas, mas nem toda falha é um defeito;

- **Defeito:** corresponde a uma causa imediata de degradação do sistema que o leva a um mau funcionamento;

- **Sintoma:** alguma mudança do comportamento normal do processo que pode ser percebida, indicando a presença de falha ou defeito;
- **Ruído:** uma perturbação indesejada que implica na deturpação, distorção da informação transmitida de forma imprevisível;
- **Resíduo:** também conhecido como desvio, corresponde à diferença entre um valor medido em um sistema real e o valor esperado em sistema simulado.

A Figura 3.1 mostra graficamente alguns desses conceitos com forma de exemplificar suas relações.

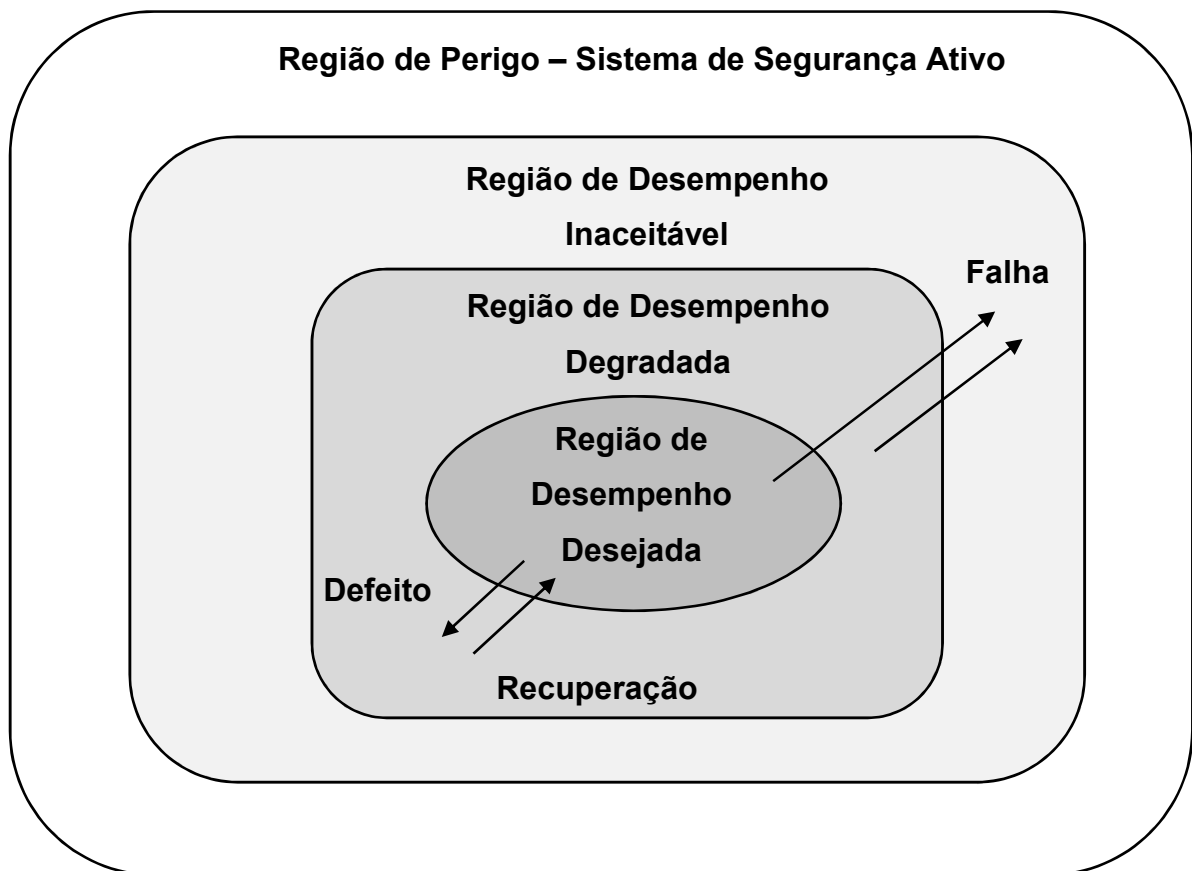


Figura 3.1 – Mapa de Conceitos Relacionados à Falhas e Falhas.

3.2.1 Tipos de Falhas

As falhas em um processo podem ser classificadas em relação a vários aspectos, dentre eles estão o tempo e a localização. Em se tratando de tempo, as falhas podem ser abruptas, incipientes ou intermitentes. As definições de cada classificação são encontradas a seguir:

- **Falhas abruptas:** são aquelas que surgem repentinamente, podendo ser decorrentes de imprevistos ou até mesmo acidentes. Essas falhas mudam o comportamento do processo rapidamente, exigindo contra-ações velozes e eficazes que possam minimizar as consequências do ocorrido.
- **Falhas incipientes:** são falhas iniciadas a partir de pequenos desvios do comportamento normal do sistema. Elas podem ser mascaradas pelos controladores, e muitas vezes passam despercebidas pelos operadores ou até mesmo pelos sistemas de detecção e diagnóstico.
- **Falhas intermitentes:** são aquelas que se alternam no tempo. Podem ser causadas por alguma perturbação periódica, ou por alguma situação que se repita ciclicamente, caracterizando-se um cenário de falha.

Considerando-se a localização, as falhas podem se encontrar no atuador, no sistema dinâmico (processo) ou no sensor. As definições de cada classificação são encontradas a seguir:

- **Falhas no atuador:** podem ser vistas como qualquer mau funcionamento do equipamento que atua o sistema.
- **Falhas no sistema dinâmico:** ocorrem quando alguma alteração no sistema muda de alguma forma a relação original de entrada e saída do mesmo.
- **Falhas em sensores:** podem ser observadas através de variações específicas nas medidas que possibilitem desconsiderá-las com variações válidas do sistema.

Existem ainda outras classificações mais específicas para falhas. Estas fogem do escopo deste trabalho podendo ser consultadas em outras publicações como [GERTLER, 1998].

3.2.2 Etapas do Processo de Detecção e Diagnóstico de Falhas

A tarefa de monitorar processos desde o seu funcionamento normal até a detecção e diagnóstico de falhas (DDF) envolve várias fases. Estas são mostradas na Figura 3.2.

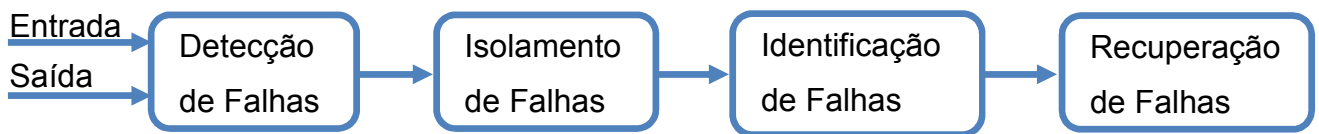


Figura 3.2 – Etapas de um Sistema DDF em Funcionamento.

Pode-se perceber que os sinais de entrada e saída do processo real são passados para o sistema DDF. É através deles que se realiza a monitoração do estado do mesmo. A percepção de que algo fugiu do funcionamento normal refere-se à etapa de detecção de faltas e falhas. Neste momento não se tem mais informações do problema ocorrido, sabe-se apenas que a relação entre a entrada e saída do processo físico não representa o funcionamento normal. A segunda etapa refere-se ao isolamento da falha, ou seja, à descoberta do local físico envolvido na falha. Assim, ele pode ser isolado dos outros componentes do processo. A terceira etapa corresponde à identificação, o que quer dizer a classificação da falha e a amplitude da mesma. Com todas essas informações, a etapa de recuperação procura tomar decisões que minimizem os danos ou que leve o processo para um estado de segurança.

3.3 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Um sistema de diagnóstico de falhas possui várias características importantes que devem ser consideradas em sua elaboração. Nem todas as características aqui abordadas são encontradas em todas as implementações e, dependendo da implementação, algumas características podem ser privilegiadas em detrimento de outras. Essas características também não fecham o espaço de propriedades que um sistema diagnóstico de falhas deve possuir. (VENKATASUBRAMANIN, et al., 2003). De qualquer forma elas são importantes

para se verificar o desempenho, a confiabilidade, a generalidade e outras qualidades desejáveis para um sistema diagnóstico. São elas:

1. **Rápida Detecção e Diagnóstico** - o sistema diagnóstico de falhas deve responder rapidamente ao detectar a falha e deverá diagnosticar também rapidamente anormalidades do processo.

2. **Isolabilidade** - é a habilidade do sistema de distinguir entre diferentes falhas. É claro que esta habilidade depende em grande parte das características do processo. Um exemplo é definir se a corrente no transformador está baixa, normal ou alta. Esta classificação de correntes vai depender de fatores como a corrente operacional na subestação ou a potência nominal do transformador.

3. **Robustez** - o sistema de diagnóstico deve ser imune (ou pelo menos resistente) a vários ruídos e incertezas. Um dos principais problemas em criar um modelo padrão para detecção de falhas é que o sistema deve reconhecer os sinais que são monitorados e que realmente são relevantes a detecção da falha. Portanto para diferentes sistemas, diferentes tipos de sinais (amplitude e frequência) são utilizados. Filtros passa-faixa, sensores de alta sensibilidade e redundância nas medições devem ser utilizados para que o sistema tenha robustez.

4. **Identificação de Falhas** - o sistema deverá sempre saber quando o sistema está operando em sua condição normal e quando está operando em sua condição anormal. Para isso, o sistema deve saber de antemão os valores pré-estabelecidos nos quais o sistema opera em sua condição normal, seja por experiência do operador ou por um processo baseado em conhecimento do próprio sistema.

5. **Classificação do Erro Estimado** - Um importante requisito para um sistema diagnóstico é a confiança do operador em suas predições para a detecção, isolamento e correção da falha. Apesar dos sistemas atuais serem muito confiáveis, sempre deve haver um operador experiente que saiba quando as hipóteses geradas pelo sistema são válidas ou não. O sistema não deve “substituir” o operador e sim servir de apoio para a tomada da decisão.

6. **Adaptabilidade** - processos em geral mudam e evoluem ao passo que ocorrem mudanças nas entradas ou mudanças estruturais do sistema. Portanto, à medida que estas condições mudam, o sistema diagnóstico deverá também alterar os seus parâmetros para evitar eventuais erros entre normalidade e anormalidade.

7. **Facilidade em Explicação** - o sistema deverá além de identificar e isolar a falha, relatar esta falha ao operador de forma clara e concisa. Esta troca de informações entre operador e sistema, é feita pela Interface Homem-Máquina (IHM).

8. **Requisitos do Sistema Diagnóstico** - O sistema diagnóstico deverá requerer o mínimo possível de informações para que a sua complexidade seja a mínima possível, mas também não deve descartar informações importantes e fundamentais para a geração de um diagnóstico preciso da falha. Alguns dados utilizados em sistemas diagnósticos têm algumas vezes relações entre si, e portanto esta relação pode ser feita no próprio sistema, evitando assim uma quantidade grande de dados.

9. **Armazenamento e Poder Computacional** - Com o avanço dos sistemas integrados em uma só rede de informação, o poder computacional deve suprir esta leva de informações do sistema com rapidez e sem perda de informações, além disso, o sistema diagnóstico deverá armazenar dados relevantes ao processo para análises e a partir destas análises poder otimizar ainda mais o mesmo.

10. **Identificação de Múltiplas Falhas** - Quando uma falha ocorre, geralmente outras falhas ocorrem, uma vez que a correta operação de um determinado setor do sistema depende de outra operação correta do sistema. O sistema diagnóstico deverá reconhecer de que forma estas falhas foram geradas e se elas têm relação umas com as outras.

3.4 TRANSFORMAÇÃO DAS MEDIDAS EM UM SISTEMA DIAGNÓSTICO

Para um sistema de diagnóstico, as medições sofrer algumas transformações, uma vez que este sistema funcionar corretamente, nem sempre é preciso saber todas as medições possíveis, ou até mesmo, pode-se relacionar alguma medida com outra, economizando memória e processamento computacional, além da complexidade do sistema também diminuir. Dois importantes componentes nestas transformações são o processo de conhecimento do sistema e a técnica de busca utilizada.

Em geral, o processo de tomada de decisão de um sistema pode ser visto como uma série de transformações feitas nas medições. Basicamente, três

transformações devem ser feitas entre espaços para que o sistema possa fazer uma tomada de decisão. A Figura 3.3 mostra as várias etapas que um sistema de detecção e diagnóstico de falhas faz antes de tomar uma decisão.

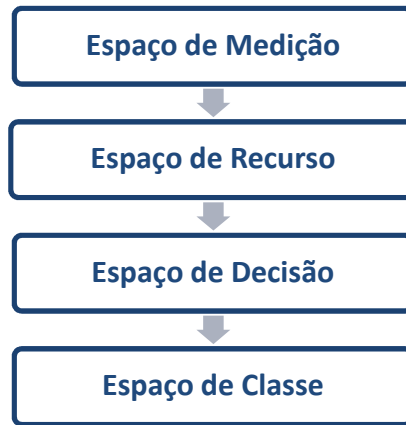


Figura 3.3. Transformações Dentro de Sistema Diagnóstico

O espaço de medição é o espaço no qual o sistema diagnóstico recebe todas às medições. Nesta etapa, as medidas encontradas pelo sistema não sofrem quaisquer transformações, ou seja, são todas as medições em sua forma “bruta”. São as entradas do sistema diagnóstico. Um exemplo são todas as medições que um sistema recebe de um IED em uma subestação, mostrados em uma matriz de coluna M que é dada por

$$M = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

sendo n a quantidade de elementos deste vetor.

Na primeira transformação que estes dados de entrada M recebem, eles migram para o espaço denominado espaço de recurso. Nesta etapa, o sistema localiza ou verifica quais valores de entrada podem ser relevantes para o processo

de detecção e diagnóstico da falha, ou ainda minimiza o número de variáveis segundo uma relação de dependência entre duas ou mais medidas.

Portanto, a matriz R do espaço de recurso é definida como:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ \vdots \\ r_p \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

sendo $p \leq n$ a quantidade de elementos deste vetor.

O mapeamento do espaço de recurso é o espaço de decisão. Nesta etapa, os valores obtidos no espaço de recurso são transformadores segundo uma função objetivo, seja por minimização ou por premissas lógicas. A transformação é feita ou por uma função discriminante ou em alguns casos por simples funções de limites. Logo, pode-se definir uma matriz D da seguinte forma:

$$D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_i \\ \vdots \\ d_q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

sendo q a quantidade de elementos deste vetor e cada elemento d_i deste vetor é dado por

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{se } |y_i - y_{desejado}| \leq \frac{5}{100} y_{desejado} \\ 1 & \text{se } |y_i - y_{desejado}| > \frac{5}{100} y_{desejado} \end{cases} \quad (3.9)$$

O espaço de classe é um grupo de inteiros que indica a classe da falha, formulando categorias para cada tipo de falha. Um tipo simples de um espaço de classe é formular condições do tipo “**SE ... ENTÃO**”, utilizando como entrada as

variáveis do espaço de decisão. Seguindo como exemplo, um espaço de classe pode ser uma variável c_1 , de valor lógico, cujo valor será '0' se $d_n = 0$; $n = 1; 2; 3$, ou seja, se as medições não ultrapassarem a porcentagem de erro de 5%, ou o valor '1' se ultrapassar a porcentagem de 5%. Este valor percentual é definido conforme determinado processo. O valor c_2 segue o mesmo raciocínio, mas para $n = 4; 5; 6$. Logo a matriz C é assim definida:

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_s \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

sendo s a quantidade de elementos deste vetor.

Tendo o espaço de classes já definido, pode-se criar uma série de premissas entre as variáveis de classe para chegar a um diagnóstico eficiente de identificação e correção da falha (VENKATASUBRAMANIN et al. 2003).

3.5 MÉTODOS PARA DETECTAR FALHAS

Várias abordagens podem ser utilizadas para se detectar falhas em um sistema. A principal diferença entre essas abordagens está no tipo de conhecimento utilizado pelo algoritmo. Considerando esse tipo de conhecimento necessário, ou seja, o discernimento entre o que é falha e o que não é, deve-se ter relacionados os sintomas observáveis em situações de falha ou normalidade do sistema. Um sistema de detecção de falhas pode ter esse conhecimento de forma explícita (por meio de uma tabela) ou pode inferi-lo por meio de uma fonte de conhecimento do domínio. Esse conhecimento do domínio pode ser desenvolvido por meio de um modelo do processo (algoritmos baseados em modelos quantitativos ou qualitativos), tendo como base o conhecimento de seus princípios básicos, ou por meio de experiências passadas com o processo (algoritmos baseados na história do processo). A seguir, são mencionadas as principais características desses tipos de abordagens.

3.5.1 Métodos Baseados em Modelos Quantitativos

Os modelos quantitativos são conjuntos de relações matemáticas quantitativas baseadas na física ou nos aspectos fenomenológicos do processo (VENKATASUBRAMANIN et al., 2003a).

Dentre as vantagens dos modelos quantitativos, pode-se citar:

- são obtidos diretamente das variáveis que descrevem a dinâmica do processo, também denominadas variáveis de estado, facilitando assim a detecção de anomalias pelo monitoramento dessas variáveis.

Dentre as desvantagens:

- há a possibilidade de que o relacionamento entre as variáveis de estado seja complexo, exigindo um esforço significativo de modelagem;
- podem existir muitas variáveis de estado, sendo algumas de difícil mensuração;
- a atualização das variáveis de estado pode envolver erros de cálculo numérico que se refletem no resultado final.

3.5.2 Métodos Baseados em Modelos Qualitativos

Os modelos qualitativos são aqueles baseados em atributos nominais e em relações lógicas entre eles. As abordagens baseadas nesses modelos incluem sistemas baseados em regras e modelos baseados no conhecimento qualitativo da física ou dos aspectos fenomenológicos do processo. As regras referem-se a decisões intermediárias (antes de se chegar a uma detecção de falha) tomadas com base em informações qualitativas do processo, visando alcançar um veredicto de falha ou normalidade. Os modelos baseados no conhecimento qualitativo da física ou dos aspectos fenomenológicos do processo envolvem o conhecimento impreciso dessas questões, como por exemplo, a utilização apenas da ordem de grandeza das variáveis de estado e a utilização de equações que não descrevem com precisão o relacionamento entre as variáveis utilizadas (VENKATASUBRAMANIN et al., 2003b; KATIPAMULA & BRAMBLEY, 2005).

Dentre as vantagens dos modelos qualitativos, pode-se citar:

- podem chegar a conclusões sobre processos sobre os quais não se têm informações precisas;
- são simples no desenvolvimento e aplicação.

Dentre as desvantagens:

- embora esse método seja fácil de ser desenvolvido, é difícil garantir que todas as regras sejam sempre aplicáveis e encontrar um conjunto completo e consistente de regras, especialmente quando o sistema é complexo;
- à medida que novas regras são adicionadas para estender as regras existentes ou ajustar circunstâncias especiais, a simplicidade é perdida.

3.5.3 Métodos Baseados no Histórico do Processo

Em contraste com as abordagens baseadas em modelos, onde o conhecimento a priori (quantitativo ou qualitativo) sobre o processo é necessário, os métodos baseados no histórico do processo baseiam-se somente em uma ampla quantidade de dados históricos do processo para obter as informações necessárias [Venkatasubramanian et al., 2003c; Kaipamula & Brambley, 2005]. O principal objetivo dos métodos baseados na história do processo é, de posse dos dados de entrada e saída, relacioná-los e transformá-los em conhecimento suficiente para a detecção, isolamento e identificação de falhas. Como exemplos de métodos baseados no histórico do processo podem ser citados métodos que utilizam classificadores estatísticos, redes neurais artificiais, sistemas imunológicos artificiais, bem como outros algoritmos de reconhecimento de padrões.

Dentre as vantagens dos métodos baseados no histórico do processo, pode-se citar:

- são adequados a problemas para os quais não se têm informações suficientes para modelá-los quantitativamente ou qualitativamente;
- são adequados a processos cujos dados são abundantes e acessíveis.

Dentre as desvantagens:

- é necessária uma grande quantidade de dados para criar o discernimento entre normalidade e falha;
- possuem limitações na capacidade de generalização, ou seja, na capacidade de discernir entre normalidade e falha para dados que se encontram fora da região amostrada e utilizada para treinar o algoritmo;
- podem possuir limitações de adaptabilidade caso não implementem um procedimento de treinamento permanente.

O presente trabalho tem seu foco nos modelos quantitativos e qualitativos, atendo às ações que podem ser tomadas para recuperar o processo.

3.6 MODELO QUANTITATIVO

Esta seção revisa os métodos de detecção e diagnóstico de falhas baseados em modelos quantitativos. Em geral, os sistemas FDI (*Fault Detection and Isolation*) podem ser baseados tanto em redundância de *hardware* quanto em redundância analítica. O conceito de redundância *hardware* e analítica é introduzido, porem apenas considerar-se o segundo caso, sendo apresentadas a seguir, as principais abordagens baseadas em redundância analítica.

3.6.1 Redundância de Hardware

Os métodos para detecção de falhas que utilizam a redundância de hardware (ou redundância física (Weber, 2002)) necessitam de equipamentos de hardware extras, como sensores, atuadores ou controladores. Esses métodos comparam as saídas de componentes redundantes (em geral, sensores ou subsistemas redundantes) com as saídas equivalentes no sistema real. Se houver uma divergência considerável entre as saídas correspondentes, considera-se a ocorrência de falha e um alarme pode ser disparado. Caso contrário, considera-se que o sistema está operando normalmente.

Havendo redundância em mais de um componente do sistema, ocorrendo uma única falha, o local em que a falha ocorre é facilmente identificado, pois haverá apenas uma divergência significativa entre os pares de componentes redundantes.

Uma vantagem desta técnica é que se os componentes redundantes apresentarem falhas, eles podem ser simplesmente ignorados, não afetando a operação do sistema. Assim, os componentes redundantes com falhas podem ser substituídos quando for apropriado.

Por outro lado, a redundância de hardware pode representar um custo adicional ao projeto do sistema ao ter que adquirir equipamentos extras. Também pode haver problemas devido à necessidade de espaços extras para acomodação dos equipamentos redundantes.

Outra desvantagem está no fato de que se a falha ocorrer em componentes do sistema que não possuem redundância, ela poderá não ser detectada facilmente, pois o sistema de detecção estaria indicando que tudo está operando normalmente. Como em geral, a redundância é feita em sensores, pode acontecer falhas em atuadores e controladores que não serão detectadas.

3.6.2 Redundância Analítica

As técnicas que utilizam a redundância analítica (ARMENGOL et al., 2003), (SIMANI, 2005), [PERSIN et al., 2002) utilizam modelos simulados (por exemplo, modelos matemáticos) do sistema para a geração dos sinais redundantes, que são comparados aos sinais medidos pelos sensores físicos. Em outras palavras, as medidas dos sensores são comparadas com os valores correspondentes obtidos analiticamente (GERTLER, 1998) do modelo matemático que reproduz o comportamento do sistema livre de falhas.

Todos os modelos baseados em FDI requerem duas fases. Na primeira fase gera inconsistências entre o comportamento atual e o esperado. Assim como inconsistências, também chamados de resíduos, são sinais artificiais que refletem as falhas potenciais do sistema. O segundo passo escolhe uma regra de decisão para um diagnóstico.

A redundância analítica é requisitada pela dependência funcional entre as variáveis do processo e é usualmente provida por um grupo de relações algébricas

ou temporais entre os estados, entradas e saídas do sistema. De acordo com essa redundância é feita, a redundância analítica pode ser classificada em duas categorias, direta e temporal.

Uma redundância direta é feita de relações algébricas entre os diferentes sensores de medição. Essa relação é útil na computação de valores da medição de um sensor a partir das medições de outros sensores. Uma discrepância indica que uma falha no sensor ocorreu.

Uma redundância temporal é obtida pelas relações de diferenças entre as saídas de diferentes sensores e as entradas de atuadores. Com o processo de entradas e saídas de dados, a redundância temporal é útil para detecção de falhas nos sensores.

Um esquema geral do uso da redundância analítica em sistemas diagnósticos está mostrado na Figura 3.4. A essência da redundância analítica no diagnóstico de falhas é a revisão do comportamento do sistema atual contra o modelo do sistema para consistência.

Qualquer inconsistência expressa como resíduo pode ser usada para os propósitos de detecção, isolamento e identificação. Os resíduos devem ser perto de zero quando nenhuma falha ocorre, mas mostram valores significativos quando há mudanças no sistema. A geração de diagnósticos de resíduos requer um modelo matemático explícito do sistema.

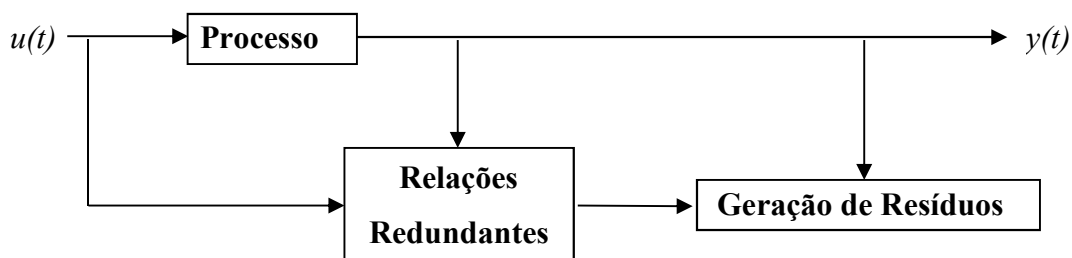


Figura 3.4 – Esquema de um Sistema Redundante Analítico.

3.6.3 Geração Residual em Sistemas Dinâmicos

Um sistema dinâmico é geralmente constituído por atuadores, planta e sensores, como pode ser visto na Figura 3.5.

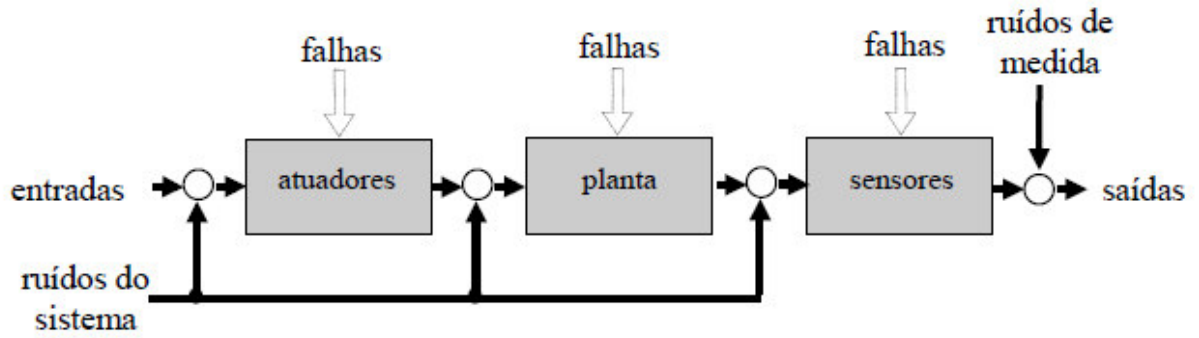


Figura 3.5 – Representação do Sistema Dinâmico.

A equação de estados e a equação de saídas do sistema dinâmico livre de falhas são dadas por

$$\dot{x}(t) = f_t(x(t), u(t), d(t)) \quad (3.11)$$

$$y(t) = g_t(x(t), u(t), d(t)) \quad (3.12)$$

na qual $x(t)$ é o vetor de estado no tempo t , $y(t)$ é o vetor de saídas no tempo t , $u(t)$ é o vetor de controle atual, $d(t)$ é o vetor de distúrbios externos não-correlacionados e, $f_t(\cdot)$ e $g_t(\cdot)$ representam as funções lineares do sistema livre de falhas. Discretizando as equações acima, o sistema dinâmico livre de falhas pode ser representado por

$$x(t + \Delta t) = f(x(t), u(t), d(t)) \quad (3.13)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), d(t)) \quad (3.14)$$

nos quais Δt é o período amostral e, por abuso de notação, x e y representam respectivamente o vetor de estados e vetor de saídas discretos. A Figura 3.6 apresenta a representação da equação de estados do sistema livre de falhas. Note que os ruídos do sistema e demais distúrbios externos não-correlacionados são representados pelo vetor $d(t)$.

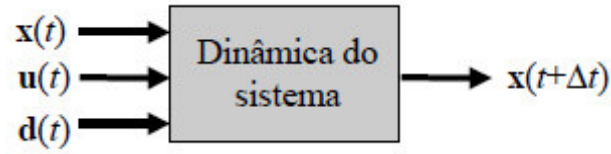


Figura 3.6 – Representação da Dinâmica do Sistema Livre de Falhas.

Considerando agora os efeitos das falhas, as equações do sistema podem ser dadas por

$$x_{\emptyset}(t + \Delta t) = f_{\emptyset}(x(t), u(t), d(t)) \quad (3.15)$$

$$y_{\emptyset}(t) = g_{\emptyset}(x(t), u(t), d(t)) \quad (3.16)$$

nas quais $f_{\emptyset}(\cdot)$ e $g_{\emptyset}(\cdot)$ representam as funções lineares do sistema na presença de falhas. Note que as falhas podem ser, ou não, entradas aditivas do sistema (ou seja, dependentes apenas do tempo t). O vetor de falhas é aqui definido como a diferença do comportamento dinâmico do sistema na presença de falhas Equação (3.15) e do comportamento dinâmico do sistema livre de falhas Equação (3.13). Assim, o vetor de falhas é dado por

$$\emptyset(t + \Delta t) = x_{\emptyset}(t + \Delta t) - x(t + \Delta t) \quad (3.17)$$

Note que na ausência de falhas no sistema, $\emptyset(t + \Delta t) = 0$ e, caso contrário, $\emptyset(t + \Delta t) \neq 0$. Geralmente, para cada tipo de falha, $\emptyset$ tem um comportamento peculiar, o qual é chamado de assinatura da falha. A Figura 3.7 ilustra o comportamento dinâmico de um sistema com dois estados, x e $x_{\emptyset}$, em que ocorre uma falha em $t = 2$. Note que para $t < 2$ o vetor de falhas é nulo.

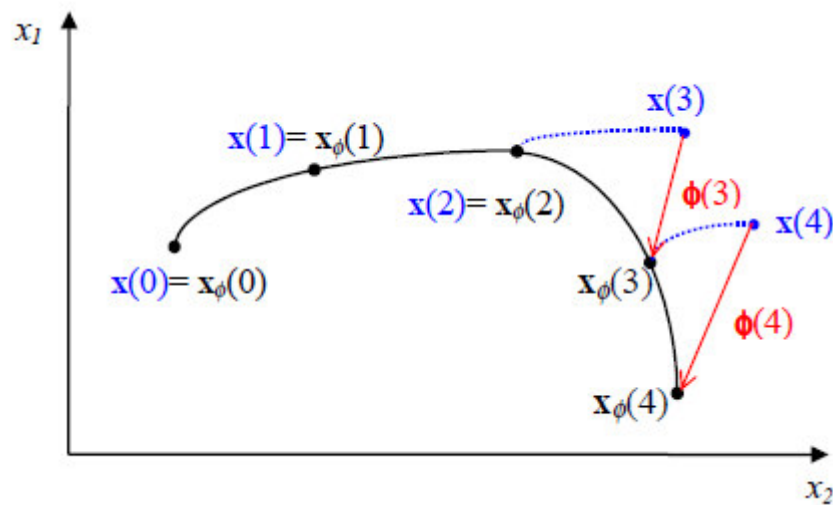


Figura 3.7 – Vetor de Falhas e Gráfico onde Ocorre uma Falha em $t = 2$.

3.7 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALHAS

Diversas são as técnicas já utilizadas na construção de ferramentas com o objetivo de detectar faltas e falhas em processos. Vale destacar que cada autor tem sua visão particular de como categorizar essas técnicas, como em (LOU et al., 2003), (GERTLER, 1998), (ANGELI & CHATZINIKOLAOU, 2004) e (VENKATASUBRAMANIN et al., 2003).

3.7.1 Detecção de Faltas com Verificação de Limites

O método mais simples e freqüentemente usado para detecção de faltas é a verificação do limite de uma variável $Y(t)$ medida diretamente. As variáveis de um processo são monitoradas e comparadas aos valores limites, também chamados de *thresholds*.

Geralmente, dois valores são escolhidos para serem os *thresholds* máximo Y_{max} e mínimo Y_{min} . O valor normal caracteriza-se quando

$$Y_{min} < Y(t) < Y_{max} \quad (3.18)$$

o que quer dizer que o processo se encontra numa situação normal se a variável monitorada se encontra dentro da faixa de tolerância. Exceder um dos *thresholds*

significa que o processo encontra-se em modo de falta ou falha. Esse método é aplicado em quase todos os sistemas de automação de processos e as variáveis podem ser: corrente de fase primária, corrente de fase secundária, temperatura do óleo, entre outras. Os *thresholds* são selecionados a partir de experiências e geralmente indicam alguma margem de segurança. A Figura 3.8 mostra a monitoração de uma variável hipotética $Y(t)$ que pode ser tensão ou corrente em *pu* (*por unidade*) e seus respectivos limites inferior Y_{min} e superior Y_{max} .

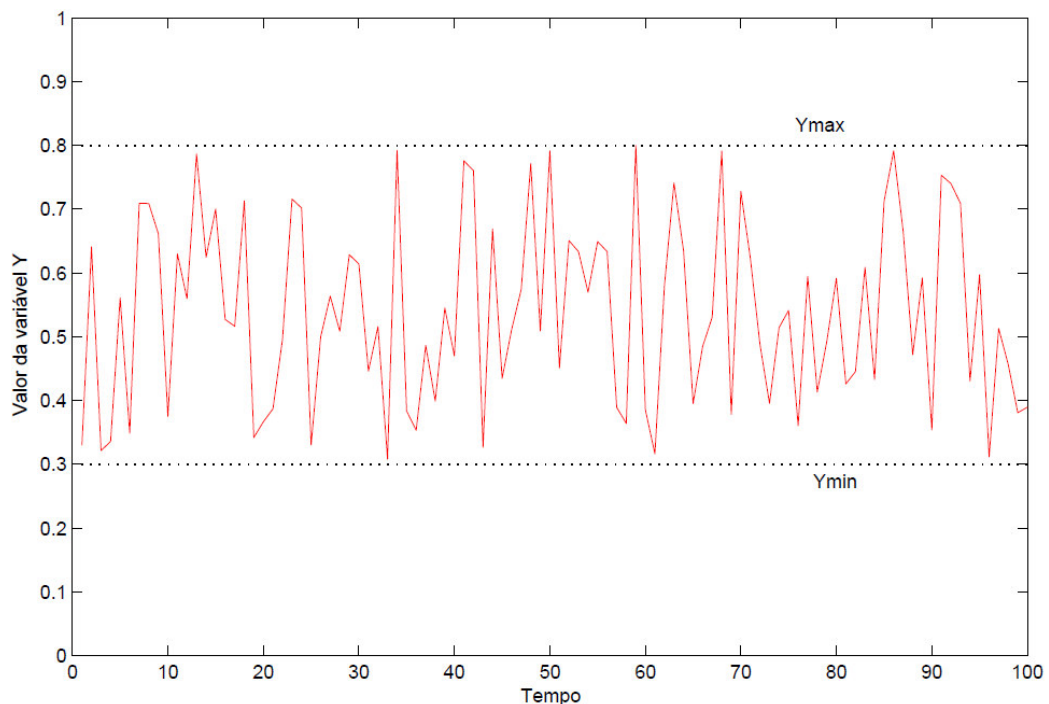


Figura 3.8 – Verificação do sinal $Y(t)$ entre os limites

Apesar de eficiente, esse tipo de verificação é bastante simplificado. Na prática, nem sempre que o sinal ultrapassa um dos limites significa a presença de falha e, nesses casos, os alarmes são gerados desnecessariamente. Outro aspecto importante é que os valores dos *thresholds* podem ser funções do ponto de operação do processo. Isto pode aumentar bastante a complexidade do procedimento.

3.7.2 Detecção de Falhas com Equações de Paridade

Uma maneira direta de detectar falhas em processos é comparar o seu comportamento real, com o seu comportamento nominal, ou seja, sem estar em modo de falha. Nesse caso, a comparação dos sinais de saída do processo real com os sinais de saída das equações do mesmo fornece os chamados resíduos, que são os sinais analisados para a decisão sobre a falha ou não.

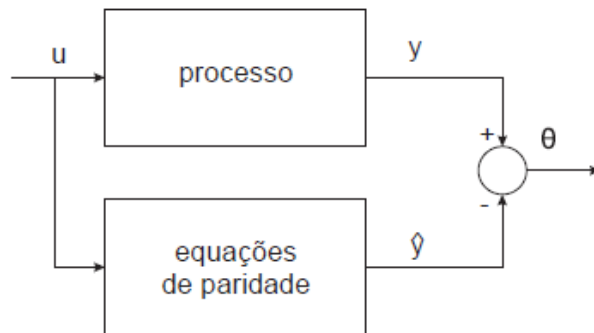


Figura 3.9 – Esquema de blocos Representando o Método de Detecção de Falhas por Equação de Paridade.

Esta abordagem tem capacidade de indicar anormalidades no processo através das discrepâncias entre o sinal de saída do processo e das equações. Porém, é necessário o conhecimento prévio da equação que governa o processo e de seus parâmetros. A Figura 3.9 ilustra em esquema de blocos essa abordagem, onde a variável θ representa os resíduos.

3.7.3 Detecção de Falhas por meio da Análise da Assinatura de Sinais.

Para processo de larga escala, como plantas elétricas, o desenvolvimento de métodos de detecção de faltas baseados em análise de dados oferecem uma maneira alternativa. Especialmente métodos baseados em análise estatística multivariável como Análise dos Componentes Principais (PCA) e Projeção por Estruturas Latentes (PLS) (VENKATASUBRAMANIN et al., 2003).

Esses métodos são ativados quando as medições dos processos são altamente correlacionados e apenas alguns eventos (faltas) produzem dados não

usuais, ou descorrelacionados. Os modelos PCA são basicamente lineares e estáticos e são desenvolvidos a partir do funcionamento normal do processo. Enquanto, eles podem ser expandidos para outras situações.

A Figura 3.10 ilustra o esquema da detecção de falhas por análise de sinais. Existem ainda técnicas amplamente utilizadas para análise de sinais como *Wavelets* e *Fast Fourier Transform* (FFT) (VENKATASUBRAMANIN et al., 2003).

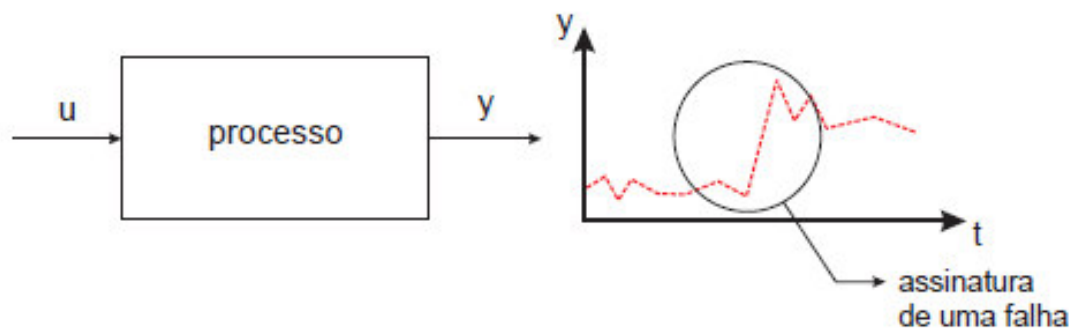


Figura 3.10 – Representação da Detecção de Falhas por Análise de Sinais.

3.7.4 Modelos de Processos e Modelagem das Falhas

Métodos de detecção de faltas baseados em modelos quantitativos usam a relação entre variáveis provenientes do modelo e do processo real para extrair informação de possíveis mudanças ocasionadas por faltas. Essas relações são, na maioria das vezes, relações analíticas na forma de equações dos modelos de processo. A Figura 3.11 mostra o esquema básico para o sistema de detecção de falhas baseado em modelo. As relações entre os sinais de entrada U e os sinais de saídas Y são representados pelo modelo matemático do processo. Métodos de detecção de faltas extraem os resíduos r . Comparando esses valores observados com os valores nominais, e aplicado métodos de detecção de diferenças, podem ser gerados os sintomas analíticos.

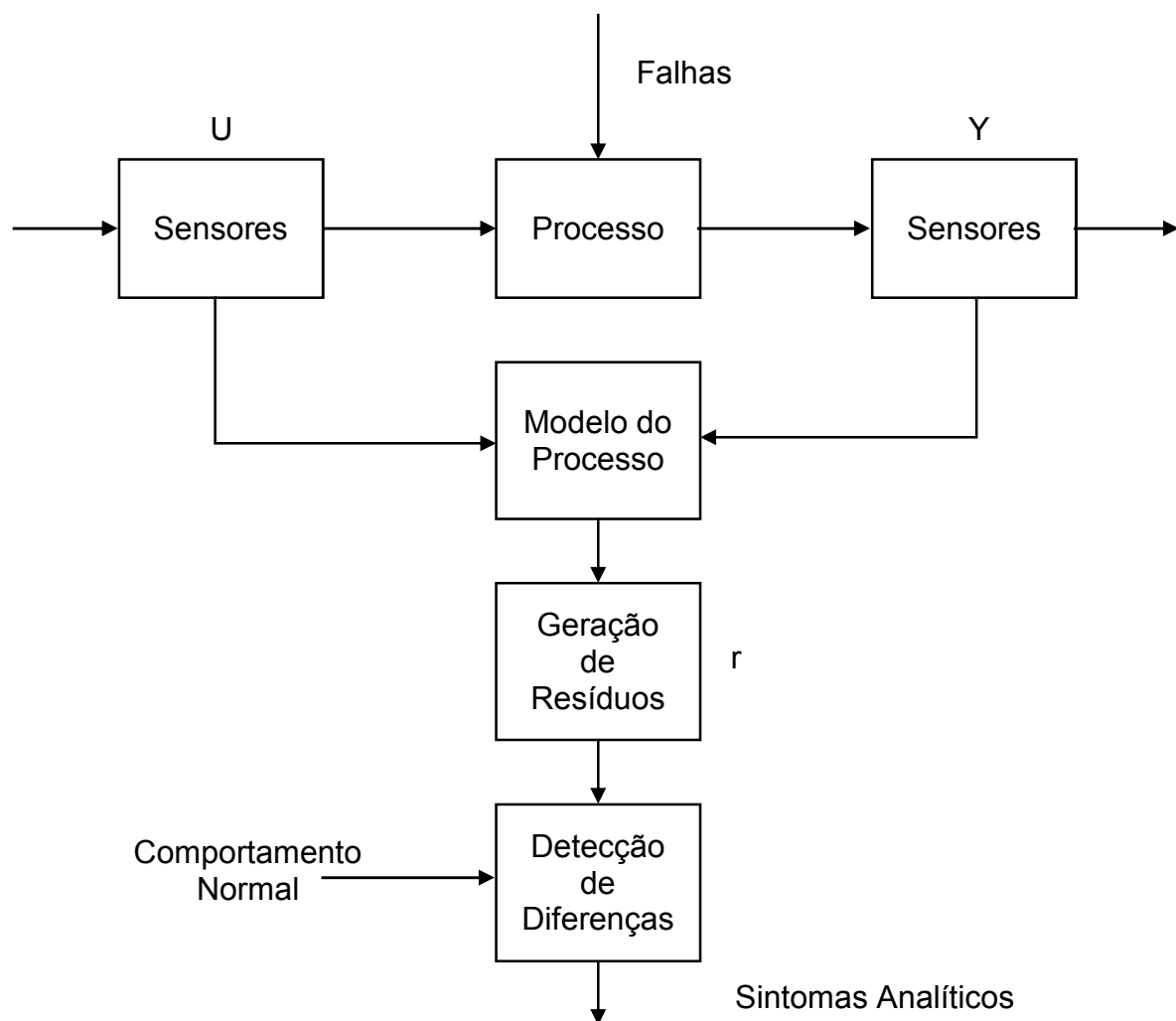


Figura 3.11 – Esquema de Detecção de Falhas Baseado em Modelos

Esses sintomas são a base para diagnóstico de falhas. Eles servirão como entrada no processo de diagnóstico e são diretamente responsáveis por indicar todos os detalhes das faltas ocorridas.

3.8 MODELO QUALITATIVO

Os métodos de diagnóstico de falhas são baseados em modelos qualitativos através de atributos nominais e em relações lógicas entre si. Em geral, os sistemas de diagnósticos, identificação e correção, podem ser baseados em métodos bastante peculiares ao processo tendo com fundamento o conhecimento qualitativo e sistemas baseados em regras. Para tanto, escolheu-se a rede neural

artificial como método de transformação do modelo qualitativo na geração de resultados. A rede neural artificial também é muito utilizada em métodos baseados no histórico do processo, porém os dados históricos serão substituídos pelo conhecimento experimental.

3.8.1 Rede Neural Artificial

As Redes Neurais Artificiais (RNA) podem ser consideradas como uma abordagem à solução de problemas na área de inteligência artificial. Nessa abordagem, ao invés de se tentar fazer com que um computador imite um comportamento inteligente, tenta-se construir um computador com um comportamento inteligente, de forma que ele erre, aprenda novas tarefas, generalize, faça descobertas e, algumas vezes, possa ser melhor do que seu professor (HAYKIN, 2001).

As RNA's são formadas por várias unidades de processamento conhecidas como neurônios. Assim como o neurônio biológico, o neurônio artificial possui um ou mais sinais de entrada e apenas um sinal de saída. As informações podem ser recebidas através de sensores ou de outros neurônios artificiais que fazem parte da rede. Estes sinais são processados e enviados para a saída. Os sinais de entrada (estímulos) devem chegar até o neurônio simultaneamente, isto é, todas as informações devem estar disponíveis, para o neurônio artificial, ao mesmo tempo.

Um dos atributos de grande importância do neurônio artificial são os pesos. Os pesos, também conhecidos por pesos sinápticos, são representados pela letra w (*weight*) e normalmente representam o grau de importância que determinada entrada possui em relação àquela determinada entrada ou neurônio.

O valor do peso é alterado em função da intensidade do sinal de entrada e, dessa forma, o peso muda o valor representativo da entrada para o neurônio correspondente (processo de aprendizagem).

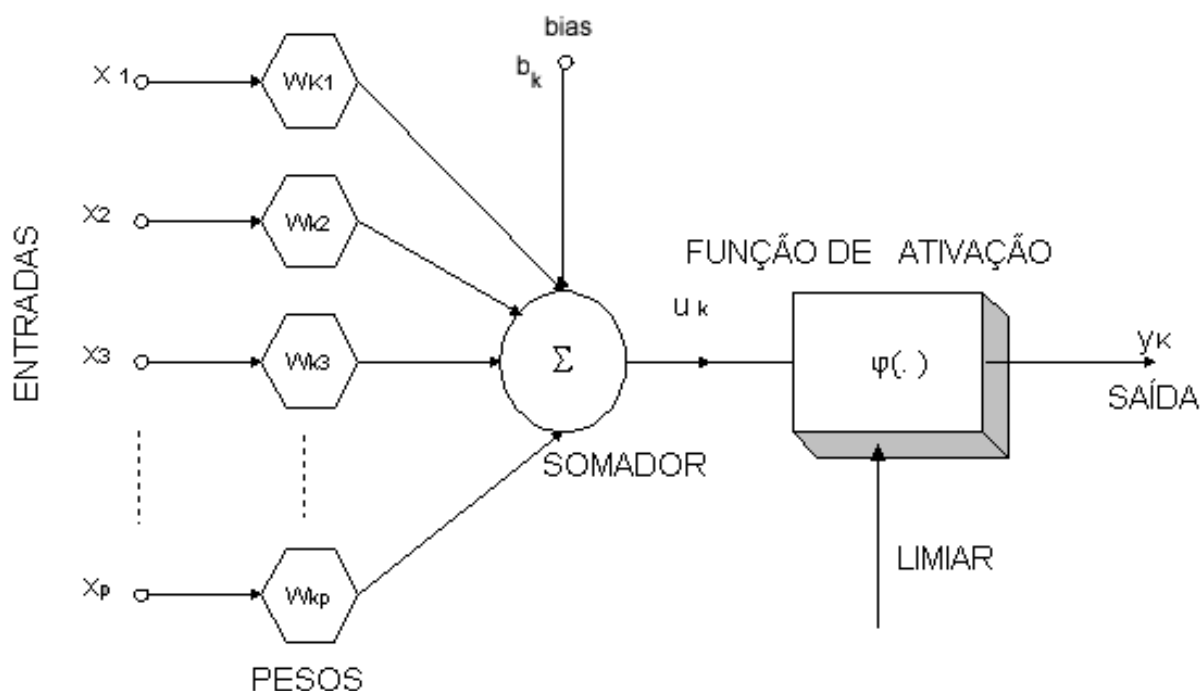


Figura 3.12 – Modelo Não-Linear de um Neurônio

Um neurônio artificial é basicamente constituído por um conjunto de sinapses, um somador e uma função de ativação, geralmente não-linear. Além disso, os conjuntos de entradas e saídas são análogos, respectivamente, aos dendritos e aos axônios do neurônio biológico (HAYKIN, 2001).

As entradas do neurônio artificial, antes de serem propagadas até a saída do mesmo, são ponderadas pelos pesos sinápticos. O somador tem o papel de somar esses sinais de entrada ponderados, tendo a função de um combinador linear. Já a função de ativação restringe a amplitude da saída de um neurônio e aplica a não linearidade.

No modelo da Figura 3.12, existe um bias, b_k , que aumenta ou diminui a entrada líquida da função de ativação, isto é, tem a função de deslocar o somatório inicial, dentro da função de ativação do neurônio, para ativar ou não a saída.

Uma modelagem matemática para um neurônio artificial k pode ser obtida através das Equações (3.19) e (3.20),

$$\mu_k = \sum_{j=1}^p w_{kj} x_j \quad (3.19)$$

$$y_k = \varphi(\mu_k + b_k) \quad (3.20)$$

onde $x_1, x_2, \dots, x_p$, são os sinais de entrada; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{kp}$ são os pesos sinápticos do neurônio k ; u_k é a saída do combinador linear devido aos sinais de entrada; b_k é o bias; $\varphi(\cdot)$ é a função de ativação e y_k é o sinal de saída do neurônio.

A próxima tarefa a ser tomada pelo neurônio é de repassar o resultado do somatório para a função de ativação $\varphi(\cdot)$, que será responsável por definir o status da saída do neurônio. Existem diversas funções de ativação, lineares ou não; sua escolha está diretamente ligada à eficiência do neurônio, e consequentemente da rede neural. Por isso, deve-se dar a devida atenção a este processo. A lógica neural expõe que a intensidade dos sinais de entrada dispara, ou não, o sinal do neurônio, fazendo com que este estimule o neurônio seguinte.

As principais funções de ativação são: função de limiar, função linear por partes e função sigmóide. A escolha dessas funções depende da aplicação da rede neural. A Figura 3.13 apresenta alguns exemplos de funções de ativação.

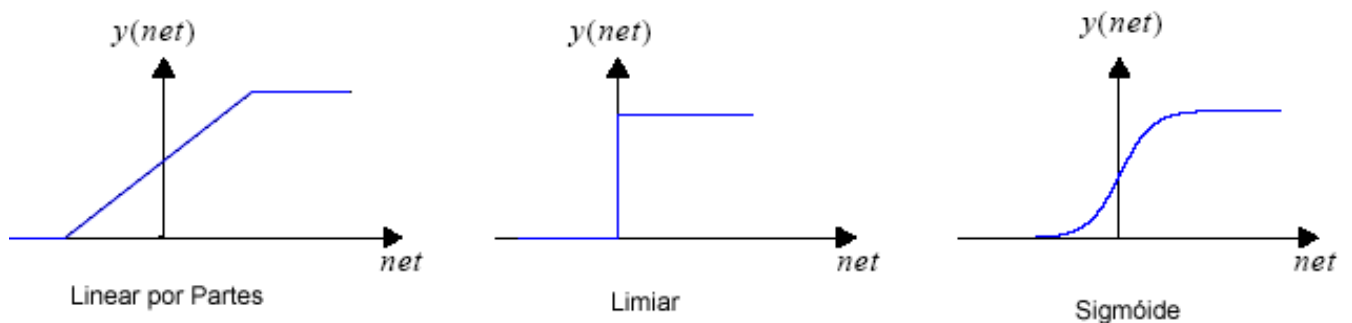


Figura 3.13 Exemplos de Funções de Ativação.

3.8.2 Perceptron de Múltiplas Camadas

As redes Perceptron de Múltiplas Camadas (MLP) têm sido usadas com sucesso em diversas aplicações nas mais variadas áreas, como por exemplo, em reconhecimento de padrões, em processamento de sinais e em controle.

A estrutura de uma MLP consiste de nós em uma camada de entrada, de um conjunto de neurônios dispostos em uma ou mais camadas ocultas (ou intermediárias) e na camada de saída. Uma rede MLP pode ser definida como uma generalização do Perceptron (BRAGA et al., 2000).

A Figura 3.14 mostra a arquitetura de uma rede MLP com uma camada de entrada, duas camadas intermediárias e uma camada de saída.

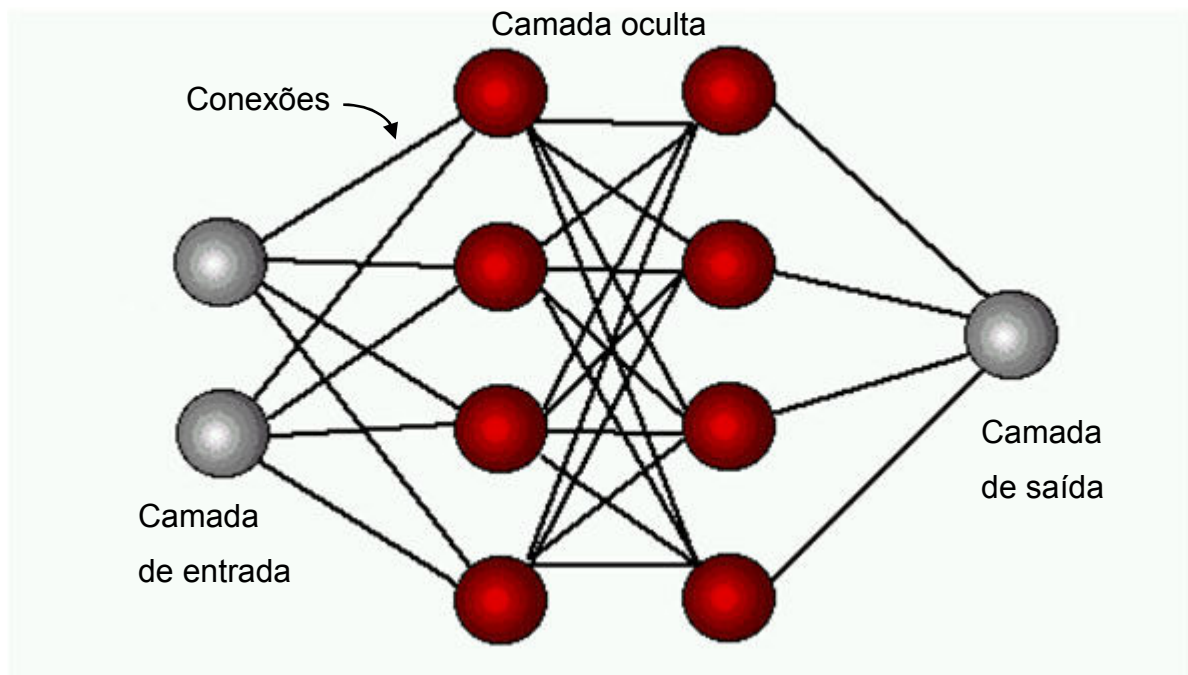


Figura 3.14 Exemplo de Arquitetura de uma Rede MLP.

Técnicas e conceitos básicos, a respeito de redes neurais artificiais, têm sido amplamente cobertos pela literatura. Porém, é importante destacar algumas vantagens do uso destas redes para que se possa melhor entender o seu relacionamento e sua aplicação em processos de reconhecimento de padrões, sendo estas:

1. Adaptabilidade: habilidade de se ajustar a novas informações;
2. Velocidade: a sua estrutura maciçamente distribuída e paralela permite uma resposta muito rápida a estímulos apresentados à RNA, o que é importante para aplicações em tempo-real;
3. Tolerância a falhas: capacidade de oferecer boas respostas mesmo com falta, confusão ou dados ruidosos;
4. Otimalidade: minimiza a taxa de erros presentes em problemas de classificação.

A capacidade de generalização de uma rede neural também se apresenta como vantagem no problema de reconhecimento de padrões. Esta generalização

refere-se à habilidade da rede neural em produzir bons resultados, mesmo quando apresentada a situações não consideradas durante o processo de aprendizagem. Desta forma, a capacidade de reconhecer padrões nunca antes vistos, porém semelhantes aos apresentados durante o treinamento, torna-se um importante diferencial perante muitas técnicas tradicionais. De um modo geral, as redes neurais são um método de modelagem altamente recomendável para se lidar com sistemas abertos ou mais complexos, pouco entendidos e que não podem ser adequadamente descritos por um conjunto de regras ou equações.

Uma rede MLP é dita progressiva, ou *feedforward*, quando as saídas dos neurônios em qualquer camada se conectam apenas com os neurônios de entrada da camada seguinte, ou seja, não possuem nenhum laço de realimentação. Dessa forma, o sinal de entrada é propagado camada a camada até chegar na camada de saída, ou seja, de forma progressiva.

A quantidade de nós na camada de entrada é determinada pela dimensão do espaço de observação. Já o número de neurônios da camada de saída é igual ao número requerido de saídas desejadas.

Para o projeto de uma MLP, deve-se determinar o número de camadas ocultas, o número de neurônios em cada uma dessas camadas e definir os pesos sinápticos dos neurônios que constituem a rede.

Definir a quantidade de camadas ocultas e os neurônios que as compõem é uma tarefa bastante complexa, pois não há regras determinadas para defini-los.

A utilização de um grande número de camadas ocultas não é recomendada. Cada vez que o erro médio durante o treinamento é utilizado para atualizar os pesos das sinapses da camada imediatamente anterior, ele se torna menos útil ou preciso. A única camada que tem uma noção precisa do erro cometido pela rede é a camada de saída. A última camada oculta recebe uma estimativa sobre o erro. A penúltima camada oculta recebe uma estimativa da estimativa, e assim por diante. Testes empíricos com a rede neural MLP backpropagation não demonstram vantagem significativa no uso de duas camadas escondidas ao invés de uma para problemas menores. Por isso, para a grande maioria dos problemas utiliza-se apenas uma camada oculta quando muito duas e não mais que isso.

Para a resolução de problemas de classificação uma rede neural com uma camada oculta é mais que suficiente. Os problemas de estimação de função

também podem ser resolvidos utilizando-se apenas uma camada, às vezes, pode ser necessária a utilização de duas camadas ocultas.

Com relação ao número de neurônios nas camadas ocultas, este é geralmente definido empiricamente. Deve-se ter cuidado para não utilizar nem unidades demais, o que pode levar a rede a memorizar os dados de treinamento (*overfitting*), ao invés de extrair as características gerais que permitirão a generalização, nem um número muito pequeno, que pode forçar a rede a gastar tempo em excesso tentando encontrar uma representação ótima. Devido a estas dificuldades é recomendado manter o número de neurônios escondidos baixo, mas não tão baixo quanto o estritamente necessário.

Existem várias propostas de como determinar a quantidade adequada de neurônios nas camadas ocultas de uma rede neural. As mais utilizadas são:

- Definir o número de neurônios em função da dimensão das camadas de entrada e saída da rede. Pode-se definir o número de neurônios na camada oculta como sendo a média aritmética ou ainda como sendo a média geométrica entre tamanho da entrada e da saída da rede.
- Utilizar um número de sinapses dez vezes menor que o número de exemplos disponíveis para treinamento. Se o número de exemplos for muito maior que o número de sinapses, *overfitting* é improvável, no entanto pode ocorrer *underfitting* (a rede não converge durante o seu treinamento).

Já a definição dos pesos sinápticos é feita utilizando algoritmos de treinamento supervisionado. O algoritmo de treinamento mais conhecido na literatura é o Algoritmo *Backpropagation*, baseado na minimização do erro usando métodos do tipo gradiente, em que o erro é retropropagado da camada de saída para as camadas intermediárias.

Esse algoritmo é constituído basicamente por dois passos: computação no sentido direto e computação no sentido reverso.

No primeiro passo do aprendizado (computação para frente), aplica-se um vetor de entrada aos nós de entrada da rede e seu efeito é propagado camada por camada até chegar à camada de saída, onde produz uma resposta ao vetor de entrada. Neste passo, os pesos sinápticos são mantidos constantes.

Na computação para trás, ajusta-se os pesos sinápticos através das regras de correção de erro. Basicamente, subtrai-se o padrão de saída desejado da

resposta à excitação de entrada da MLP, que corresponde ao sinal de erro. Então, propaga-se esse sinal de erro através dos neurônios no sentido contrário ao que o vetor de entrada foi propagado no passo anterior, por isso o nome *backpropagation*. À medida que o erro é propagado, os pesos sinápticos são ajustados de forma que a resposta obtida pela MLP se aproxime ao máximo do padrão de resposta desejada.

3.8.3 Algoritmo MLP com Treinamento por Retropropagação do Erro

A Figura 3.15 mostra a arquitetura que será aplicada neste trabalho utilizando as metodologias citadas na seção anterior como forma de simplificar e obter o melhor resultado.

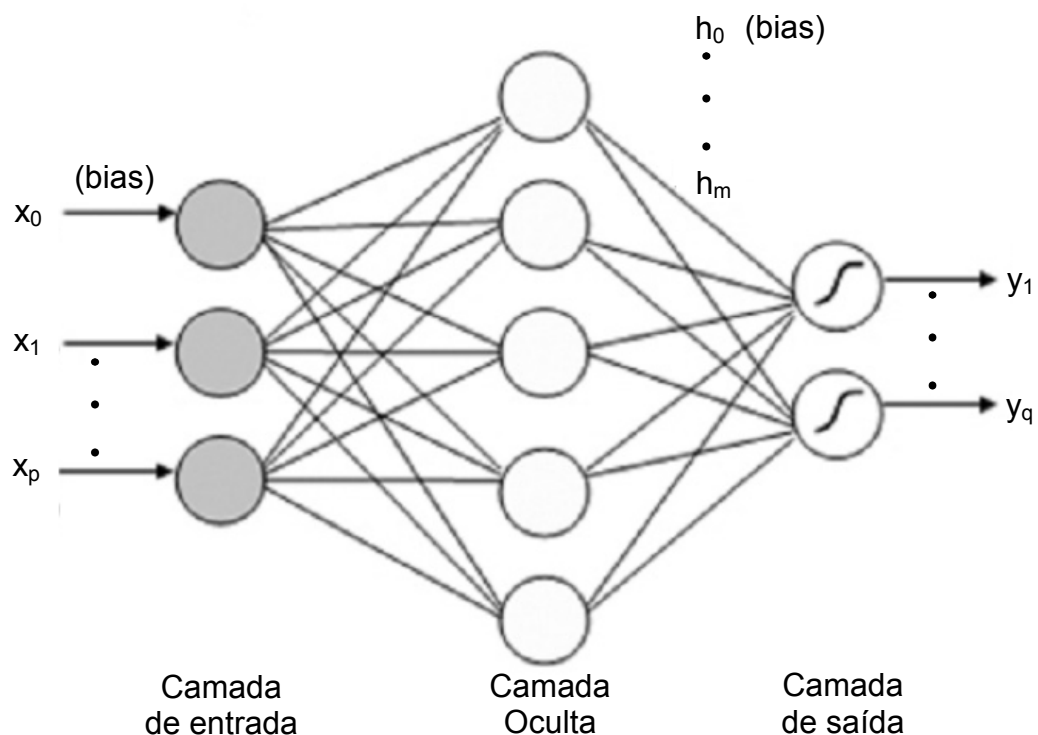


Figura 3.15 Arquitetura da RNA proposta no trabalho

A relação entrada/saída do MLP define um mapeamento de um espaço de entrada Euclidiano p -dimensional para um espaço de saída Euclidiano q -dimensional continuamente diferenciável. Um MLP com apenas uma camada oculta. O vetor de entrada é apresentado aos nós da camada de entrada e o vetor de saída é apresentado aos neurônios da camada de saída da rede.

Resumidamente, o algoritmo *backpropagation* pode ser definido da seguinte maneira:

1) Condições Iniciais: Inicialização aleatória dos pesos sinápticos e limiares ou arquivo peso de outros treinamentos.

2) Propagação: Para um MLP, apresentando-se o n -ésimo padrão de entrada $x(n) = [x_1(n) \ x_2(n) \ \dots \ x_p(n)]^T$, a ativação do neurônio de saída k e ativação dos neurônios j da camada oculta, respectivamente são dados

$$h_j(n) = \varphi_j(\sum_{i=0}^p w_{ji}(n)x_i(n)) \quad (3.21)$$

$$y_k(n) = \varphi_k(\sum_{j=0}^m w_{kj}(n)h_j(n)) \quad (3.22)$$

nas quais φ_k é a função de ativação não-linear do neurônio k , w_{kj} é o peso entre a saída do neurônio k (camada anterior) e a entrada do neurônio j (camada posterior), $i = 1, \dots, p$ é o índice dos neurônios da camada de entrada, $j = 1, \dots, m$ é o índice dos neurônios da camada oculta e $k = 1, \dots, q$ é o índice dos neurônios da camada saída. Uma função de ativação não-linear comumente empregada no MLP é a sigmoideal que é dada por

$$\varphi_a(v_a) = \frac{1}{1+\exp(-v_a)} \quad (3.23)$$

na qual v_a é o nível de ativação interna no neurônio a .

Portanto, o sinal de erro instantâneo na saída k da rede para um dado conjunto de treinamento $(y(n), d(n))$ pode ser calculado através da Equação (3.24). Apresentando-se o n -ésimo padrão de treinamento ($n = 1, \dots, n_p$) na entrada do MLP, onde o padrão de saída é $y(n) = [y_1(n) \ y_2(n) \ \dots \ y_q(n)]^T$ e a saída desejada é $d(n) = [d_1(n) \ d_2(n) \ \dots \ d_q(n)]^T$. Portanto, o erro instantâneo é dado por

$$e_k(n) = d_k(n) - y_k(n) \quad (3.24)$$

A soma dos erros quadráticos instantâneos nas saídas do MLP para o padrão n é dada por

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^q e_k^2(n) \quad (3.25)$$

e o erro médio quadrático sobre o conjunto de treinamento é dada por

$$E_{medio} = \frac{1}{n_p} \sum_{n=1}^{n_p} E(n) \quad (3.26)$$

3) Retropropagação. Cálculo do gradiente local utiliza a lei delta [HERTZ et al., 1991], onde as conexões ocultas e a camada de saída são ajustadas por

$$\Delta w_{kj}(n) = -\eta(n) \frac{\partial E(n)}{\partial w_{kj}(n)} \quad (3.27)$$

na qual η é a taxa de aprendizagem e Δw_{kj} é a correção aplicada ao peso w_{kj} . Da Equação (3.26) e (3.24), chega-se a lei de ajuste dos pesos

$$\Delta w_{kj}(n) = -\eta(n) \delta_k(n) h_k(n) \quad (3.28)$$

na qual

$$\delta_k(n) = e_k(n) \varphi'_k(v_k(n)) \quad (3.29)$$

Do mesmo modo, para as conexões entre a camada de entrada e a camada oculta, tem-se que o ajuste de pesos é dado por

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta(n) \delta_j(n) x_j(n) \quad (3.30)$$

na qual

$$\delta_j(n) = \varphi'_j(v_j(n)) \sum_{k=1}^q \delta_k(n) w_{kj}(n) \quad (3.31)$$

Em seguida, os pesos sinápticos da rede devem ser ajustados de acordo com as Equações (3.32) e (3.33), em que α é a constante de momento e η a taxa de aprendizado.

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \alpha w_{kj}(n-1) + \eta \delta_k(n) y_k(n) \quad (3.32)$$

$$w_{ji}(n+1) = w_{ji}(n) + \alpha w_{ji}(n-1) + \eta \delta_j(n) h_j(n) \quad (3.33)$$

O parâmetro taxa de aprendizado tem grande influência durante o processo de treinamento da rede neural. Uma taxa de aprendizado muito baixa torna o aprendizado da rede muito lento, ao passo que uma taxa de aprendizado muito alta provoca oscilações no treinamento e impede a convergência do processo de aprendizado. Geralmente seu valor varia de 0,1 a 1,0. Uma sugestão seria o valor 0,4.

Um método simples de aumentar a velocidade de convergência e evitar a instabilidade é modificar a lei de ajuste adicionando um termo de momentum que é proporcional ao ajuste de pesos anterior (HAYKIN, 2001). Este termo pode ou não ser utilizado durante o treinamento e seu valor varia de 0,0 (não utilização) a 1,0. O valor recomendado para o termo momentum é 0,3.

4) Critério de Parada: Os passos de treinamento 2 e 3 devem ser executados usando novas épocas de treinamento até que o critério de parada seja atingido. Existem vários métodos para a determinação do momento em que o treinamento de uma rede neural deve ser encerrado. Uma boa determinação destes critérios é fundamental para um bom treinamento e conseqüentemente uma boa generalização. Os critérios de parada mais utilizados são:

- Número de ciclos

Define o número de ciclos de treinamento, ou seja, o número de vezes em que o conjunto de treinamento é apresentado à rede. Um número excessivo de ciclos pode levar a rede à perda do poder de generalização (*overfitting*). Por outro lado, com um pequeno número de ciclos a rede pode não chegar ao seu melhor desempenho (*underfitting*). Sugere-se um valor entre 500 e 3000 ciclos de treinamento.

- Erro

Consiste em encerrar o treinamento após o erro médio quadrático ficar abaixo de um valor a pré-definido. Vale lembrar que um erro médio quadrático muito pequeno não implica necessariamente numa boa generalização (i.e. bom desempenho com dados não vistos anteriormente). Este valor depende muito do problema. Uma sugestão é estabelecer um valor de 0,01 no primeiro treinamento e depois ajustá-lo em função do resultado.

CAPÍTULO 4

CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA PARA DETECÇÃO DE FALHA NA MANUTENÇÃO DETECTIVA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho se faz necessário devido a grande importância que a subestação (SE) é para continuidade do fornecimento de energia elétrica. Identificar se algum instrumento que faz a proteção e medição da SE está provocando interrupções no fornecimento de forma indevida, será o principal objetivo deste trabalho. Neste capítulo vai mostrar todo o desenvolvimento do projeto, isto é, da concepção inicial até a solução fundamentada na teoria apresentada.

4.2 MODELAGEM DA INFORMAÇÃO

Primeiramente, caracteriza a modelagem da informação para posteriormente abordar a técnica baseada em modelos quantitativos e qualitativos para a detecção e diagnóstico de falha (DDF).

Na Figura 4.1, tem-se o diagrama unifilar da SE de Maracanã (MAR) que pertence a Companhia Energética do Maranhão (CEMAR) e está localizado no distrito industrial de São Luis atendendo a várias indústrias, comércios e residências. Esta SE servirá como planta do processo no qual foi desenvolver as modelagens.

Na Figura 4.2, tem-se a representação da arquitetura de comunicação da automação da SE MAR mostrada na figura anterior. Nesta arquitetura tem dois canais de dados com seus respectivos protocolos de comunicação. O primeiro canal tem o protocolo *Distributed Network Protocol* versão 3 (DNP3) do qual está alocado para operação. A quantidade de informações trafegada é bem limitada, pois se faz necessário uma filtragem da informação antes de ser disponível ao supervisor. No segundo canal tem o protocolo proprietário onde tem a disponibilidade de escolher a quantidade de informação necessária sem prejudicar a operação do sistema.

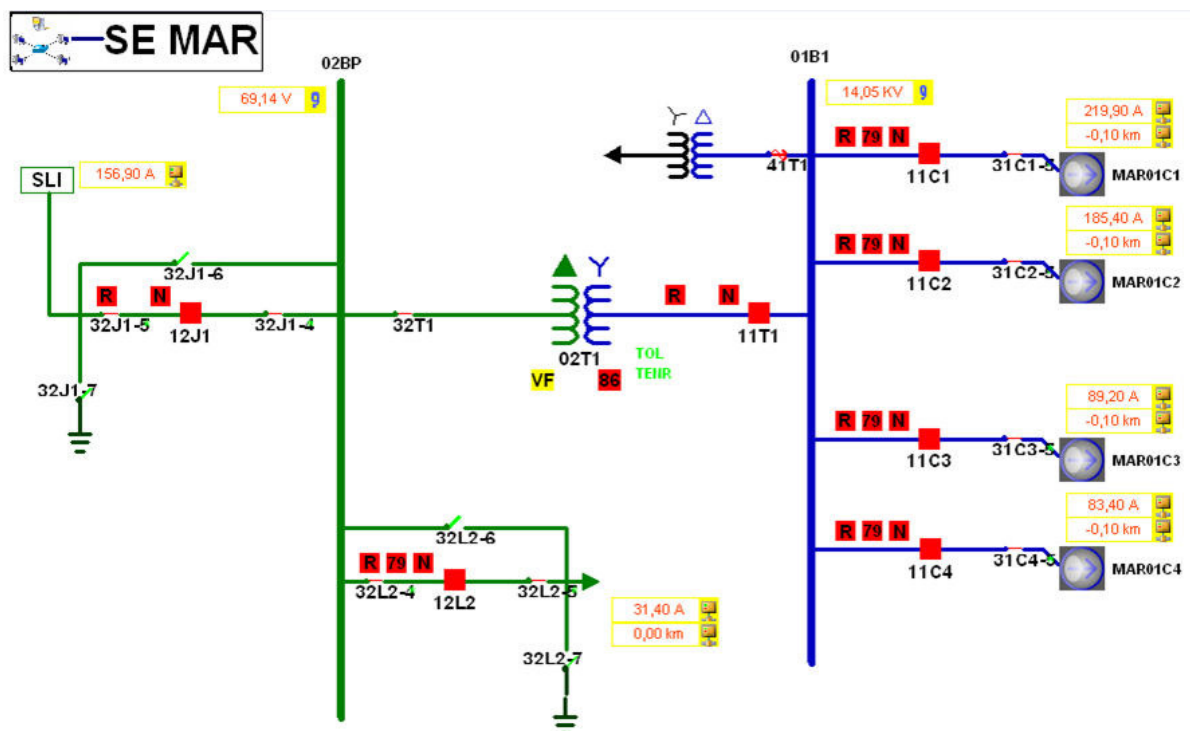


Figura 4.1 – Diagrama Unifilar Subestação Maracanã – CEMAR

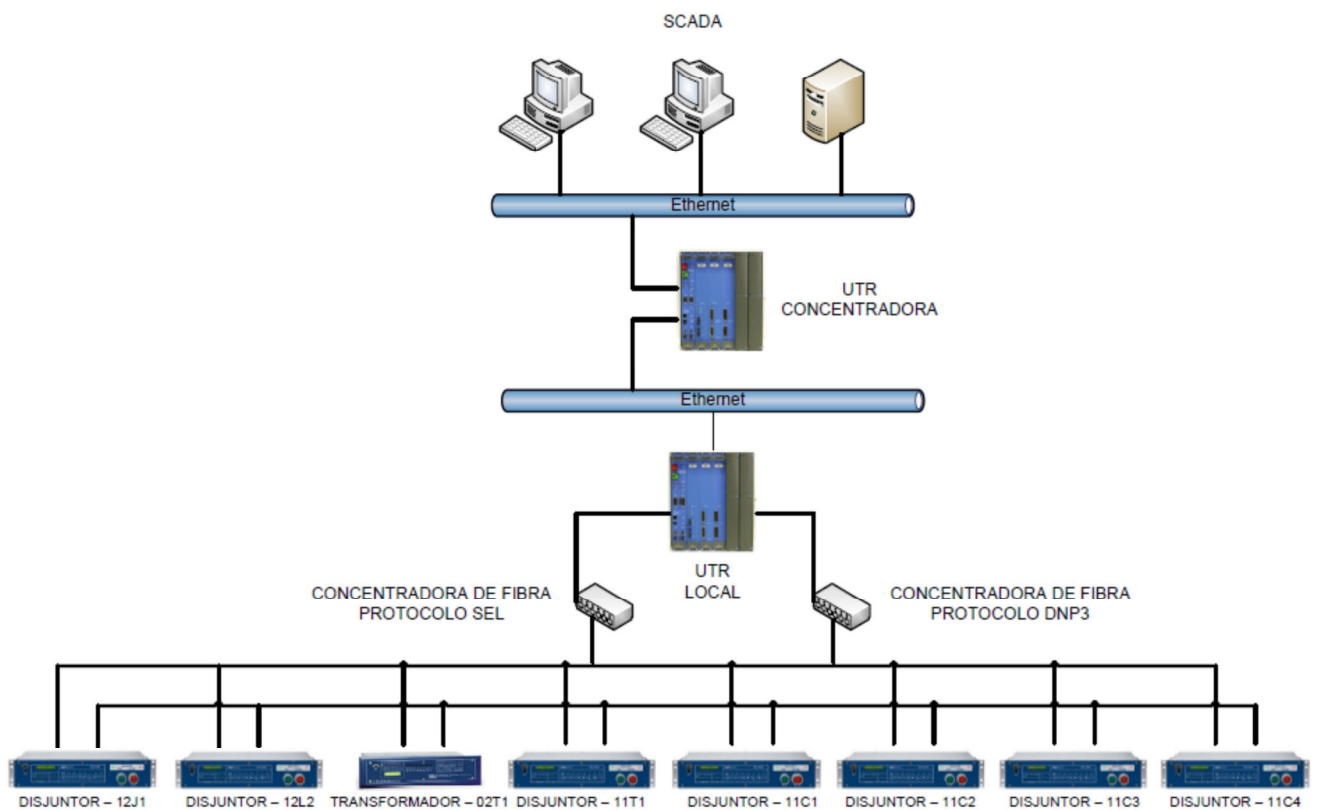


Figura 4.2 – Arquitetura de Comunicação da Automação - SE MAR

Na Figura 4.3 apresenta-se a arquitetura básica de um Sistema de Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Equipamentos. Esses dados advindos das UACs são armazenados em um concentrador na sala de controle da subestação e enviados para um servidor da central de monitoramento de equipamentos da subestação (servidor CME/SE). Posteriormente, essas informações são transmitidas, através do sistema de telecomunicação, para um Centro de Gestão da Manutenção (CGM) na qual os dados são tratados adequadamente por algoritmos de monitoramento e diagnóstico de falhas de equipamentos.

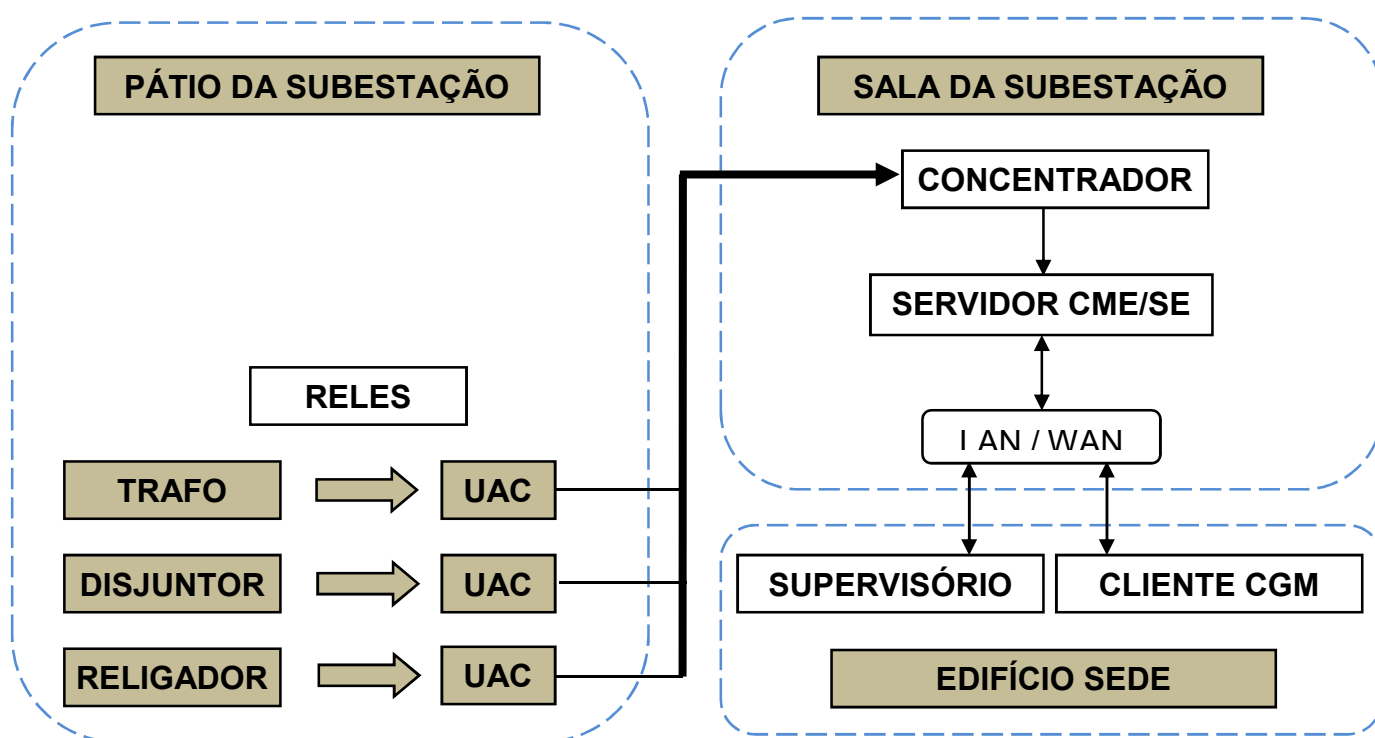


Figura 4.3 – Arquitetura de Automação para Sistema de Diagnóstico

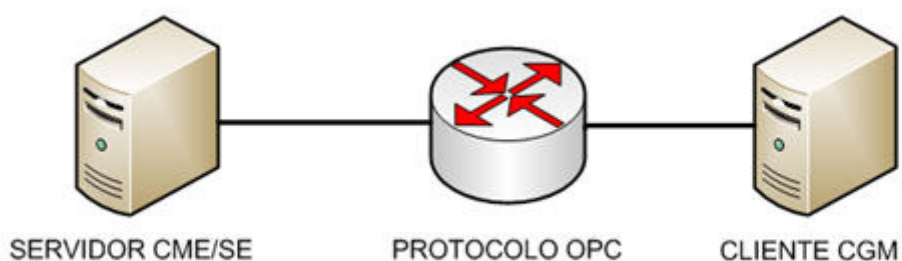


Figura 4.4 – Diagrama de Comunicação entre Servidor e Cliente

No servidor CME/SE, está sendo executado o LabVIEW®, enquanto o Cliente CGM está sendo executado o MATLAB® cuja a transmissão dos dados se faz pelo protocolo Ole for Process (OPC) conforme Figura 4.4.

Na Figura 4.5 apresenta-se o diagrama dos modelos para recuperação de falha no nível I. A teoria de sistemas de variáveis contínuas (SVC) fornece fundamentos teóricos para detecção de falhas em subestações, enquanto que teoria de sistemas de estados discretas (SED) fornece os fundamentos para o desenvolvimento de modelos em variáveis discretas. Estes modelos realizam uma avaliação da informação quantitativa e qualitativa que são oriundas dos relés de todos os equipamentos. Esta avaliação está fundamentada na matriz transição de eventos.

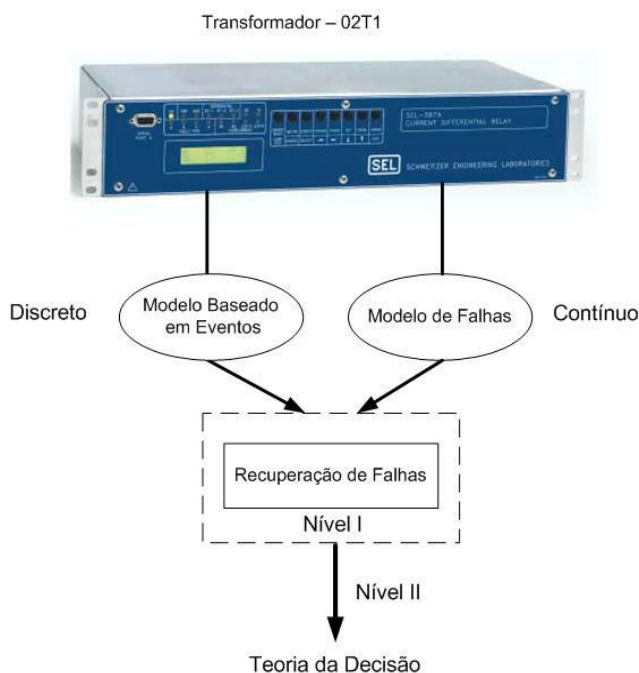


Figura 4.5 – Diagrama dos Modelos para Recuperação de Falha no Nível I

Na Figura 4.6, apresenta-se os pontos de informação do transformador que são monitorados no relé. Foi delineado o conjunto SVC e o conjunto SED conforme retratado na figura. Pelo mesmo princípio acima, vai-se coletar informações, variáveis SVC e SED, dos demais relés da subestação que farão parte dos modelos para tomada de decisão.

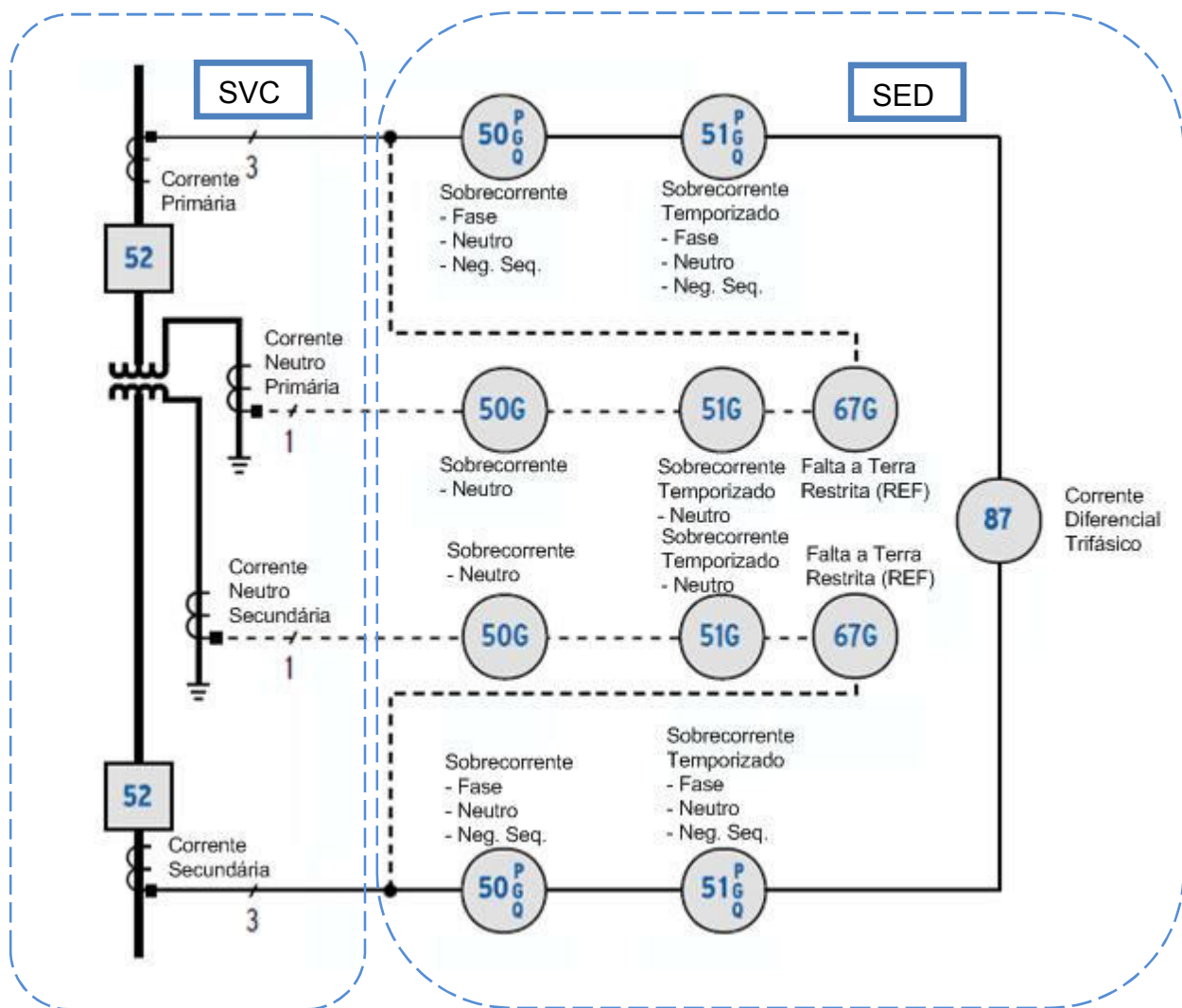


Figura 4.6 – Pontos de Informação do Transformador no Relé

4.3 MODELOS DE PROCESSOS

A automação e monitoramento da subestação permitem o acesso às informações seguras e rápidas para os setores de operação e manutenção, principalmente na área de técnicas preditivas. Fornecem elementos que podem subsidiar a operação do sistema, minimizando ou até mesmo eliminando as transições de estado operativo de seguro para emergência.

Como forma de simplificação dos modelos de processos, divide-se uma subestação em 6 grupos com o intuito de ter um único modelo independente da subestação em estudo.

Na Figura 4.7, tem-se o modelo de processo no qual foi transformado a SE MAR.

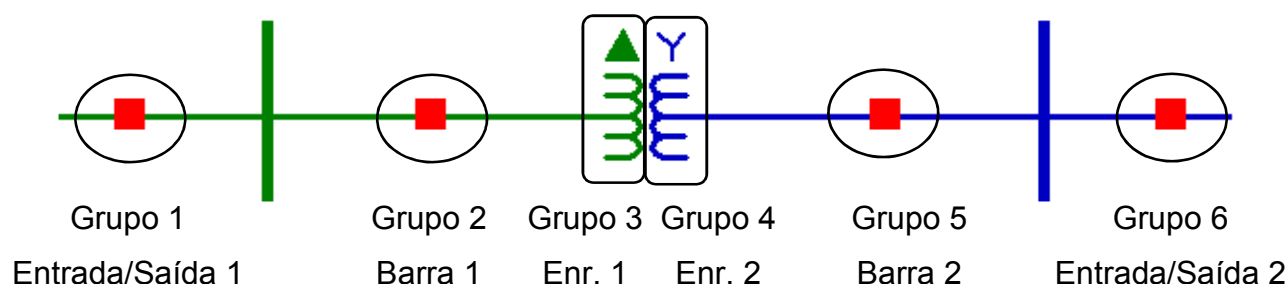


Figura 4.7 – Modelo Simplificado do Processo

Para cada grupo, vai aplicar os conhecimentos físicos e matemáticos para torná-lo equivalente. Portanto, para SE MAR tem-se:

Grupo 1 Entrada/Saída 1 – Somatório de todas as entradas (69KV) menos o somatório de todas as saídas (69KV). Neste caso, tem-se: 12J1 (entrada) e 12L2 (saída).

Grupo 2 Barra 1 – Somatório de todas as barras (69KV). Neste caso não existe barra.

Grupo 3 Enrolamento 1 – Somatório de todos os enrolamentos (69KV) dos transformadores. Neste caso, tem-se: 02T1 (transformador).

Grupo 4 Enrolamento 2 – Somatório de todos os enrolamentos (13,8KV) dos transformadores. Neste caso, tem-se: 02T1 (transformador).

Grupo 5 Barra 2 – Somatório de todas as barras (13,8KV). Neste caso, tem-se: 11T1 (Barra).

Grupo 6 Entrada/Saída 1 – Somatório de todas as entradas (13,8KV) menos o somatório de todas as saídas (13,8KV). Neste caso, tem-se: 11C1 (saída), 11C2 (saída), 11C3 (saída) e 11C4 (saída). Não existe entrada neste grupo.

4.3.1 Transformação das Medidas Quantitativas

Como foi comentado anteriormente, a transformação de uma medida passa por 4 espaços até chegar ao formato desejado. Entre cada espaço tem uma transformação no qual escolheu algum recurso fundamentado na teoria citada neste trabalho. Este método tem como objetivo a detecção de falsos alarmes.

1°) Espaço de Medição

$$M_{SVC} = \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ I_{G3} \\ I_{G4} \\ I_{G5} \\ I_{G6} \\ V_{E1} \\ V_{E2} \\ P_S \\ Q_S \\ F \end{bmatrix} \quad \text{onde:} \quad \begin{array}{l} I_{G1} = \text{Corrente Grupo 1 por Fase} \\ I_{G2} = \text{Corrente Grupo 2 por Fase} \\ I_{G3} = \text{Corrente Grupo 3 por Fase} \\ I_{G4} = \text{Corrente Grupo 4 por Fase} \\ I_{G5} = \text{Corrente Grupo 5 por Fase} \\ I_{G6} = \text{Corrente Grupo 6 por Fase} \\ V_{E1} = \text{Tensão Enrolamento 1} \\ V_{E2} = \text{Tensão Enrolamento 2} \\ P_S = \text{Potência Ativa da Subestação} \\ Q_S = \text{Potência Reativa da Subestação} \\ F = \text{Frequencia} \end{array} \quad (4.1)$$

2°) Espaço de Recurso

Na primeira transformação, vão-se filtrar somente as variáveis SVC de corrente de toda subestação, esta grandeza faz a proteção da SE. Portanto, o relé transforma esta grandeza em eventos que serão modelados no método qualitativo.

$$R_{SVC} = \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ I_{G3} \\ I_{G4} \\ I_{G5} \\ I_{G6} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

3°) Espaço de Decisão

$$D_{SVC} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ \vdots \\ d_{141} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Na segunda transformação, irá gerar os resíduos e condicioná-los para o espaço de decisão. Vai dividir a geração dos resíduos em duas análises: por fase e entre fases. Devido as características físicas do processo, pode-se usar este artifício como forma de simplificação sistemática. O fator de transformação (FT) é a compensação das correntes do enrolamento 1 e enrolamento 2 do transformador. Estes parâmetros são definidos na construção do mesmo, pois está associado as caracterísitas intrínsecas estruturais.

- Decisão Por Fase:

i) Decisão Direta Fasorial (Fase A)

$$d_1 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3A} - I_{G1A}| \leq \frac{5}{100} I_{G3A} \\ 1 & \text{se } |I_{G3A} - I_{G1A}| > \frac{5}{100} I_{G3A} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$d_2 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4A} - I_{G5A}| \leq \frac{5}{100} I_{G4A} \\ 1 & \text{se } |I_{G4A} - I_{G5A}| > \frac{5}{100} I_{G4A} \end{cases} \quad (4.5)$$

O primeiro elemento do espaço de decisão d_1 calcula o resíduo pela diferença da corrente fase A do grupo 3 e 1 do modelo simplificado. Se o valor absoluto do resíduo estiver acima de 5% do valor da corrente do grupo 3, o elemento sinaliza uma anormalidade. Este valor percentual pode variar conforme a sensibilidade que se deseja. Para o segundo elemento, tem-se o mesmo raciocínio. Geram-se todos os resíduos da combinação dos grupos com relação a corrente da fase A. Portanto, têm-se dez elementos (d_1 a d_{10}) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para fase B com dez elementos (d_{21} a d_{30}) e C com dez elementos (d_{41} a d_{50}) que está explicitado no Anexo C.

ii) Decisão Temporal Fasorial *Delay* (Fase A)

$$d_{11} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1A}(t) - I_{G1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G1A}(t) - I_{G1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G1A}(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

O décimo primeiro elemento do espaço de decisão d_{11} calcula o resíduo pela diferença da corrente fase A do grupo 1 do instante atual e instante anterior. Se o valor absoluto do resíduo estiver acima de 5% do valor da corrente do grupo 1 no instante atual, o elemento sinaliza uma anormalidade. Este valor percentual pode variar conforme a sensibilidade que se deseja. Geram-se todos os resíduos dos grupos com relação a corrente da fase A. Portanto, têm-se cinco elementos (d_{11} a d_{15}) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para fase B com cinco elementos (d_{31} a d_{35}) e C com cinco elementos (d_{51} a d_{55}) que está explicitado no Anexo C..

iii) Decisão Temporal Fasorial Média Horária(Fase A)

$$d_{16} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1A} - \overline{I_{G1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{G1A} - \overline{I_{G1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G1A}} \end{cases} \quad (4.7)$$

O décimo sexto elemento do espaço de decisão d_{16} calcula o resíduo pela diferença da corrente fase A do grupo 1 do instante atual com sua média horária. A cada instante de tempo calcula a média por um período de 1 hora. Após este tempo, inicia-se uma nova média horária. Se o valor absoluto do resíduo estiver acima de 5% do valor da corrente do grupo 1 da média horária, o elemento sinaliza uma anormalidade. Geram-se todos os resíduos dos grupos com relação a corrente da fase A. Portanto, têm-se cinco elementos (d_{16} a d_{20}) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para fase B com cinco elementos (d_{36} a d_{40}) e C com cinco elementos (d_{56} a d_{60}) que está explicitado no Anexo C.

- Decisão Entre Fases:

iv) Decisão Direta Fasorial (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 e Disjuntor 12L1)

$$d_{61} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1A} - I_{12J1B}| \leq \frac{5}{100} I_{12J1A} \\ 1 & \text{se } |I_{12J1A} - I_{12J1B}| > \frac{5}{100} I_{12J1A} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$d_{64} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L2A} - I_{12L2B}| \leq \frac{5}{100} I_{12L2A} \\ 1 & \text{se } |I_{12L2A} - I_{12L2B}| > \frac{5}{100} I_{12L2A} \end{cases} \quad (4.9)$$

O sexagésimo primeiro elemento do espaço de decisão d_{61} calcula o resíduo pela diferença da corrente entre a fase A e B do componente (12J1) do grupo 1 do modelo simplificado. Se o valor absoluto do resíduo estiver acima de 5% do valor da corrente do componente (12J1) da fase A, o elemento sinaliza uma anormalidade. Este valor percentual pode variar conforme a sensibilidade que se deseja. O sexagésimo quarto elemento de decisão d_{64} calcula o resíduo pela diferença da corrente entre a fase A e B do componente (12L2) do grupo 1. Geram-se todos os resíduos das combinações dos componentes do grupo com relação a corrente entre fases. Portanto, têm-se seis elementos (d_{61} a d_{66}) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para o grupo 3 com três elementos (d_{67} a d_{69}), grupo 4 com três elementos (d_{70} a d_{72}), grupo 5 com três elementos (d_{73} a d_{75}) e grupo 6 com doze elementos (d_{76} a d_{87}) que está explicitado no Anexo C.

v) Decisão Temporal Fasorial *Delay* (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 e Disjuntor 12L1)

$$d_{88} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1A}(t) - I_{12J1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{12J1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{12J1A}(t) - I_{12J1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{12J1A}(t) \end{cases} \quad (4.10)$$

O octogésimo oitavo elemento do espaço de decisão d_{88} calcula o resíduo pela diferença da corrente fase A e B do componente (12J1) do grupo 1 do instante atual e instante anterior respectivamente. Se o valor absoluto do resíduo estiver acima de 5% do valor da corrente do componente do grupo 1 no instante atual, o elemento sinaliza uma anormalidade. Este valor percentual pode variar conforme a sensibilidade que se deseja. Geram-se todos os resíduos das combinações dos componentes do grupo com relação a corrente entre fases. Portanto, têm-se seis elementos (d_{88} a d_{93}) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para o grupo 3 com três elementos (d_{94} a d_{96}), grupo 4 com três elementos

(d_{97} a d_{99}), grupo 5 com três elementos (d_{100} a d_{102}) e grupo 6 com doze elementos (d_{103} a d_{114}) que está explicitado no Anexo C.

vi) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 e Disjuntor 12L1)

$$d_{115} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1A} - \overline{I_{12J1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{12J1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{12J1A} - \overline{I_{12J1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{12J1B}} \end{cases} \quad (4.11)$$

O centésimo décimo quinto elemento do espaço de decisão d_{115} calcula o resíduo pela diferença da corrente da fase A e média horária da fase B do componente (12J1) do grupo 1. Se o valor absoluto do resíduo estiver acima de 5% do valor da média horária da corrente do componente (12J1) do grupo 1, o elemento sinaliza uma anormalidade. Geram-se todos os resíduos das combinações dos componentes do grupo com relação a corrente entre fases. Portanto, têm-se seis elementos (d_{115} a d_{120}) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para o grupo 3 com três elementos (d_{121} a d_{123}), grupo 4 com três elementos (d_{124} a d_{126}), grupo 5 com três elementos (d_{127} a d_{129}) e grupo 6 com doze elementos (d_{130} a d_{141}) que está explicitado no Anexo C.

4º) Espaço de Classe

$$C_{SVC} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ \vdots \\ C_{54} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Na terceira transformação, irá aplicar os conceitos da redundância analítica (RA) para gerar as classes com intuito da detecção e isolamento da falha (DIF). O princípio básico da RA:

- Com dois instrumentos de medição só pode detectar se existe incoerência na medição.

- Com mais de dois instrumentos de medição pode além de detectar, também isolar a falha com a seguinte restrição: pelo menos dois instrumentos estejam com medição coerente. Caso contrário, só pode detectar. Para atender esta condição não pode ter a função lógica *AND* com menos de três elementos do espaço de decisão.

A função da detecção analisa se a medição está em defeito ou falha. A função da isolamento aponta qual instrumento está com problema.

Portanto, têm-se 54 classes que vão diagnosticar se existe algum instrumento de medição danificado, evitando assim falsos alarmes.

i) Redundância Analítica Defeito (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 – Fase A)

$$\text{Por Fase: } PF_1 = AND(d_1, d_5, d_6, d_7); \quad (4.13)$$

$$\text{Entre Fases: } EF_1 = AND(d_{61}, d_{63}); \quad (4.14)$$

$$c_1 = AND(PF_1, EF_1); \quad (4.15)$$

O primeiro elemento do espaço de classe c_1 calcula a função lógica *AND* de todos os elementos correspondente ao componente (12J1) de decisão por fase e entre fases da redundância analítica direta. Isto reforça o princípio básico da RA. Quando todos os elementos estiverem ativos, o sistema de recuperação sinalizará defeito no disjuntor 12J1 na fase A.

ii) Redundância Analítica Falha (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 – Fase A)

$$\text{Por Fase: } PF_2 = OR(AND(d_1, d_5, d_6, d_7, d_{11}), AND(d_1, d_5, d_6, d_7, d_{16})); \quad (4.16)$$

$$\text{Entre Fases: } EF_2 = OR(AND(d_{61}, d_{63}, d_{88}, d_{90}), AND(d_{61}, d_{63}, d_{115}, d_{117})); \quad (4.17)$$

$$c_2 = AND(PF_2, EF_2); \quad (4.18)$$

O segundo elemento do espaço de classe c_2 calcula a função lógica *AND* de todos os elementos correspondente ao componente (12J1) de decisão por fase da redundância analítica direta e temporal gerando dois termos. Aplica-se a função lógica *OR* para estes termos. Repeti o mesmo raciocínio para decisão entre fases. Finalmente aplica-se a função *AND* para sintetizar as funções geradas anteriormente. Quando as combinações dos elementos estiverem ativas, o sistema de recuperação sinalizará falha no disjuntor 12J1 na fase A.

Para os elementos de classe foi caracterizado pela fase A do disjuntor 12J1. Deve-se repetir a mesma aplicação para fase B e C no qual se tem os seguintes elementos: (c_3 e c_4) e (c_5 e c_6), respectivamente. Portanto, têm-se seis elementos (c_1 a c_6) no espaço de classe definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para o componente 12L2 do grupo 1 com seis elementos (c_7 a c_{12}), 02T1 do grupo 3 com seis elementos (c_{13} a c_{18}), 02T1 do grupo 4 com seis elementos (c_{19} a c_{24}), 11T1 do grupo 5 com seis elementos (c_{25} a c_{30}), 11C1 do grupo 6 com seis elementos (c_{31} a c_{36}), 11C2 do grupo 6 com seis elementos (c_{37} a c_{42}), 11C3 do grupo 6 com seis elementos (c_{43} a c_{48}) e 11C4 do grupo 6 com seis elementos (c_{48} a c_{54}), que está explicitado no Anexo C.

4.3.2 Transformação das Medidas Qualitativas

Os relés também transformam medidas quantitativas em qualitativas com função de controle e automação da subestação, similar a metodologia aplicada na transformação das medidas quantitativas. Este conjunto de eventos é chamado *target (TAR)*. Vai trabalhar com eventos tanto do relé quanto do espaço de classe da transformação quantitativa.

1º) Espaço de Medição

$$M_{SED} = \begin{bmatrix} TAR12J1 \\ TAR12L1 \\ TAR02T1 \\ TAR11T1 \\ TAR11C1 \\ TAR11C2 \\ TAR11C3 \\ TAR11C4 \\ C_{SVC} \end{bmatrix} \quad \text{onde TAR é o conjunto de todas variáveis discretas padrão do respectivo relé.} \quad (4.19)$$

2°) Espaço de Recurso

$$R_{SED} = \begin{bmatrix} P12J1 \\ P12L1 \\ P02T1 \\ P11T1 \\ P11C1 \\ P11C2 \\ P11C3 \\ P11C4 \\ C_{SVC} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Na primeira transformação, foram filtrados somente os eventos de proteção de sobrecorrente. A letra P representa o conjunto de eventos de *TRIP* da função temporizada ou instantânea de sobrecorrente.

3°) Espaço de Decisão

$$D_{SED} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_8 \\ d_9 \\ \vdots \\ d_{36} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

i) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 12J1)

$$d_1 = OR(PT12J1A, PT12J1B, PT12J1C) \quad (4.22)$$

O primeiro elemento do espaço de decisão d_1 calcula a função lógica *OR* de todos os elementos correspondente ao componente (12J1) pela proteção de sobrecorrente temporizado de fase.

ii) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 12J1)

$$d_2 = OR(PI12J1A, PI12J1B, PI12J1C) \quad (4.23)$$

O segundo elemento do espaço de decisão d_2 calcula a função lógica *OR* de todos os elementos correspondente ao componente (12J1) pela proteção de sobrecorrente instantânea de fase.

iii) Decisão Defeito (Disjuntor 12J1)

$$d_3 = OR(c_1, c_3, c_5) \quad (4.24)$$

O terceiro elemento do espaço de decisão d_3 calcula a função lógica *OR* de todos os elementos correspondente ao componente (12J1) que sinaliza defeito de fase.

iv) Decisão Falha (Disjuntor 12J1)

$$d_4 = OR(c_2, c_4, c_6) \quad (4.25)$$

O quarto elemento do espaço de decisão d_4 calcula a função lógica *OR* de todos os elementos correspondente ao componente (12J1) que sinaliza falha de fase.

Para os elementos de decisão foi caracterizado para o disjuntor 12J1. Portanto, têm-se quatro elementos (d_1 a d_4) no espaço de decisão definido no Anexo C. Aplica-se o mesmo conceito para o componente 12L2 do grupo 1 com quatro elementos (d_5 a d_8), 02T1 do grupo 3 com quatro elementos (d_9 a d_{12}), 02T1 do grupo 4 com quatro elementos (d_{13} a d_{16}), 11T1 do grupo 5 com quatro elementos (d_{17} a d_{20}), 11C1 do grupo 6 com quatro elementos (d_{21} a d_{24}), 11C2 do grupo 6 com quatro elementos (d_{25} a d_{28}), 11C3 do grupo 6 com quatro elementos (d_{29} a c_{32}) e 11C4 do grupo 6 com quatro elementos (d_{33} a d_{36}), que está explicitado no Anexo C.

4°) Espaço de Classe

$$C_{SVC} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Na terceira transformação, irá aplicar a RNA para gerar as classes como intuito de termos identificação e correção da falha (ICF). Após o término desta etapa, finaliza a DDF e posteriormente será tomada a decisão. Os elementos da classe vão qualificar a prioridade da falha medindo sua intensidade. Portanto, na Tabela 4.1 resume a relação entre os elementos do espaço de classe e as prioridades da manutenção. Para cada prioridade tem um tempo associado à realização de manutenção preventiva. Esta forma de relatar o problema facilita a compreensão do operador que é um item das características de detecção: facilidade de explanação. A prioridade P1 é uma anomalia crítica de rápida evolução que pode tirar o sistema a qualquer momento e precisa uma ação de correção rápida cujo prazo estipulado pela manutenção é até 5 dias.

Tabela 4.1 – Correlacionamento da Classe com sua Prioridade

CLASSE	PRIORIDADE
C1	P1
C2	P2
C3	P3
C4	P4

No anexo B, a tabela B.2 quantifica o tempo de cada prioridade. Portanto, este tempo será ação corretiva que o operador vai sinalizar a manutenção.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da modelagem quantitativa e qualitativa aplicando os algoritmos da redundância analítica e rede neural artificial através de processos reais e simulados.

Os modelos estão estruturados de forma sequencial, isto é, primeiro ocorre a RA e posteriormente a RNA, pois é na RA que tem o início da etapa do processo DDF que é a detecção conforme Figura 3.2. Se não for detectada alguma anormalidade na instrumentação, a RNA ficará parada, esperando ocorrer o evento.

Primeiramente, analisou o treinamento da RNA de acordo com suas configurações no qual o conjunto de treinamento será baseado no conhecimento experimental através de regras. O objetivo desta etapa é obter a matriz peso do treinamento para ser carregada na terceira transformação no método qualitativo do sistema de recuperação de falha.

Mesmo tomando todos os cuidados para a configuração e o treinamento de redes neurais, pode acontecer do resultado final não ser satisfatório. Quando isso acontece, recomenda-se realizar novamente o treinamento da rede mantendo os parâmetros inalterados. Se esta prática não levar a um bom resultado, devem-se realizar pequenas alterações nos parâmetros iniciais de configuração.

Na fase seguinte, foram feitas simulações e análises dos resultados dos modelos quantitativos e qualitativos obedecendo esta sequência. Após os comentários pertinentes levantado nesta fase, iremos analisar o processo real e acompanhar durante certo período o seu comportamento.

Todo o desenvolvimento das aplicações foi implementado na plataforma de software que é constituída pelo MATLAB® e LabVIEW®, formando um ambiente de programação projetado para atender as necessidades do projeto proposto. Esta plataforma oferece interface gráfica para facilitar a interação homem-máquina e protocolo de comunicação OPC e DNP3 para integrar soluções.

O projeto de interface com o usuário é um tema que tem se tornado cada vez mais importante à medida que o uso de computadores cresce. Deve-se entender que a interface é o modo pelo qual o usuário mapeia suas tarefas sobre o conjunto de ferramentas disponíveis em um sistema computacional.

O projeto de interface é um diferencial em qualquer projeto, pois se for muito bem desenvolvido, levará o usuário a um ritmo normal de interação. Mas se não for adequado, levará o usuário à insatisfação.

5.1 PROJETO

Deve-se perceber que é preciso obter um modelo que não seja muito rígido a ponto de não modelar fielmente os dados, mas que também não seja excessivamente flexível a ponto de modelar também o ruído presente nos dados.

5.1.1 Projeto da RNA

O Algoritmo de treinamento da rede segue as teorias apresentadas na Seção 3.8.3 do Capítulo 3. Para o treinamento da rede MLP, foi utilizado um total de 256 padrões de eventos, pertencentes a diversas situações de distúrbio dentro de uma subestação típica que obedece a duas regras do conhecimento experimental do processo. Exemplo: Se acontecer um defeito no disjuntor 12J1 com atuação da proteção, o sistema tem que identificar a prioridade P1, enquanto para outro disjuntor 11T1 com as mesmas características, identificaria a prioridade P3. A Tabela 5.1 mostra de forma simplificada as regras de treinamento por retropropagação do erro para MLP.

Tabela 5.1 – Resumo das Regras do Conjunto de Treinamento

Regra 1

Falha	P1	P2
Defeito	P3	P4
	Com Proteção	Sem Proteção

Regra 2

Falha	P3	P4
Defeito	P1	P2
	Com Proteção	Sem Proteção

- **Regra 1 para Grupo 1 e Grupo 6:** Variáveis de proteção tem prioridade baixa, enquanto as variáveis de detecção tem prioridade alta. Motivo: As variáveis de proteção acontecem numa frequência maior.

- **Regra 2 para Grupo 2, Grupo 3, Grupo 4 e Grupo 5:** Variáveis de proteção tem prioridade alta, enquanto as variáveis de detecção tem prioridade baixa. Motivo: As variáveis de proteção acontecem numa frequência menor.

O vetor de entradas é formado pelos elementos do espaço de decisão do método qualitativo e o vetor de saídas desejadas é formado pelos elementos do espaço de classe do mesmo método.

Durante o treinamento da rede neural foi também analisada a melhor arquitetura da rede neural para o problema proposto. Para isto, foram realizados testes com diferentes arquiteturas, número de camadas ocultas e número de neurônios em cada camada oculta.

A Tabela 5.2 apresenta o resultado de seis experimentos realizados para selecionar a melhor arquitetura da RNA. A análise foi feita baseando na percentagem de diagnósticos corretos com um conjunto de novos padrões de eventos (casos para teste). Para os resultados foram considerado os parâmetros iniciais conforme mostra na Tabela 5.3. Para chegar nestes parâmetros, primeiramente utilizou a arquitetura do caso 2, sugerido no Capítulo 3 através de conhecimentos práticos. Depois de executar a RNA e obter 99% de acerto, modificou a arquitetura conforme Tabela 5.2 para comparação. Para certificar o melhor caso, repetiu o passo anterior alterando os dois últimos parâmetros da Tabela 5.3. O resultado final reafirmou os resultados da Tabela 5.2. Para cada caso foi repedido 4 vezes o treinamento.

Tabela 5.2 – Avaliação da Arquitetura RNA

Caso	Nº de camada oculta	Nº neurônios da camada oculta	Nº de Épocas	(%) de diagnóstico correto no teste
1	1	15	1000	92%
2	1	20	1000	99%
3	1	25	1000	95%
4	2	15	1000	89%
5	2	20	1000	92%
6	2	25	1000	91%

Tabela 5.3 – Parâmetros do Treinamento por Retropropagação do Erro no MLP

Número de unidades na camada de entrada	36
Número de unidades na camada de saída	4
Função de Ativação Utilizada	sigmoidal
Taxa de aprendizagem	0,4
Momentum	0,3

5.1.2 Experimentos da RNA

A Figura 5.1 representa a interface da RNA para treinamento da rede cujos parâmetros da Tabela 5.3 já estão inseridos de acordo com a arquitetura definida na Tabela 5.2. Usou-se 90% dos dados de entrada para treinar e 10% para testar. Armazena-se uma época durante o treinamento para validar a rede. Conforme já comentado, o critério de parada se faz pela condição que primeiro for atendido: erro quadrático médio ou número de épocas.

Como se deseja um maior número de acertos na resposta da rede, um grande número de épocas de treinamento é necessário. Neste trabalho, um total de 1.000 épocas foi utilizado. O erro médio quadrático do MLP depois deste período foi de 1×10^{-4} para o conjunto de treinamento conforme Figura 5.1. O teste de validação apresentou um erro médio quadrático muito próximo do treinamento comprovando que o número de épocas foi suficiente.

Vale ressaltar que durante o treinamento, o critério de parada da época estava na frente, porém logo foi ultrapassado pelo erro médio quadrático devido o conjunto de treinamento convergir rapidamente. Esta observação se deve ao fato que os parâmetros iniciais dos elementos peso foram aleatórios.

Foi gasto o tempo de 1min:27s que é relativamente baixo e não prejudica o processamento de recuperação de falha proposto. Além do treinamento ser realizado em paralelo com a operação do sistema proposto.

The screenshot displays the RNA software interface with the following sections:

- Parâmetros de Treinamento:**
 - Numero de Epocas: 1000
 - Erro Médio Quadrático: 0.0001
 - Taxa de Aprendizagem: 0.4
 - Momento: 0.3
- Função de Ativação:**
 - ☐ Degrau
 - ☐ Linear
 - ☒ Sigmoidal
- Conjunto de Padrões:**
 - Treinamento: 90 %
 - Validação: 335 ° Epoca
 - Teste: 10 %
- Arquivo de Treinamento:**
 - Dados de Entrada: CGM2_input.txt (Atualizar)
 - Saída Desejada: CGM2_target.txt (Atualizar)
- Peso Inicial:**
 - ☐ Arquivo Peso: (Atualizar)
 - ☒ Peso Aleatorio
- Arquivo Peso:**
 - Salvar
 - Exportar
- Tempo de Treinamento:** 0h:1min:26s.955ms
- Epoca:** 335
- Erro:** 9.9814e-00
- Sequencia de Treinamento:**
 - Treinamento
 - Erro Médio Quadrático: 9.98142e-005
 - Erro Médio Absoluto: 0.00574314
- Sequencia de Validação:**
 - Validacao
 - Erro Médio Quadrático: 9.94307e-005
 - Erro Médio Absoluto: 0.00573336
- Sequencia de Teste:**
 - Teste
 - Erro Médio Quadrático: 0.000301201
 - Erro Médio Absoluto: 0.00900238
- Buttons:** Novo Treinamento, Sair

Figura 5.1 Resultado do Treinamento da RNA.

Após o treinamento da RNA, podem-se carregar estas informações no sistema de recuperação de falha para tomar a decisão baseada nesta análise. O sistema está preparado também para funcionar mesmo sem o arquivo de peso gerado no treinamento, porém não teve o diagnóstico completo.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE FALHA

Nesta Seção, apresentam-se os módulos que compõem o sistema de recuperação de falha. Como também se explica o comportamento operacional de cada módulo.

A Figura 5.2 mostra a interface geral do sistema em tempo real projetada para subestação de Maracanã do diagrama unifilar da Figura 4.1 e executando rotinas para detectar alguma anomalia na instrumentação. Observe que a tela é uma representação simplificada do conteúdo do Capítulo 4 visando facilitar o entendimento do sistema de forma simples e rápida para tomada de decisão.

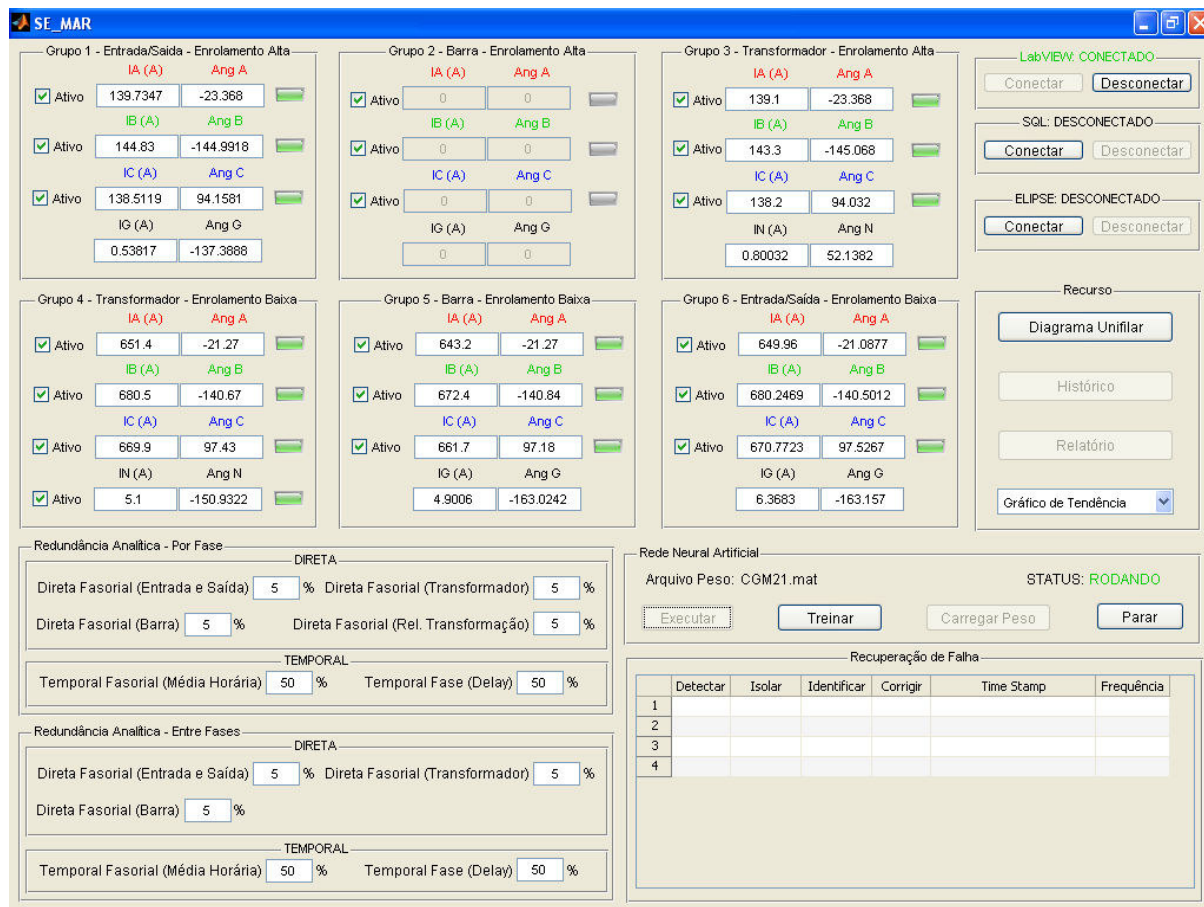


Figura 5.2 Sistema de Recuperação de Falha.

Devido à atual configuração do sistema supervisorio da CEMAR, que adquire e mantém os dados utilizados pela SE proposta, é possível simular uma falha através do protocolo DNP3, apenas com o uso de um notebook conectado a UTR, sem que seja necessário provocar uma saída real da subestação, ou seja, simular distorção nas instrumentações e proteções, onde foram analisados os resultados previstos e realizados.

Na Figura 5.3 apresenta-se o módulo de sinalização e medição da instrumentação da SE MAR equivalente a um quadro de sinóptico. Seu desenvolvimento foi baseado conforme modelo simplificado do processo mostrado na Figura 4.7. Para cada grupo tem um *led* associado a sua fase que sintetiza o

comportamento da instrumentação. A Tabela 5.4 faz um resumo deste comportamento.

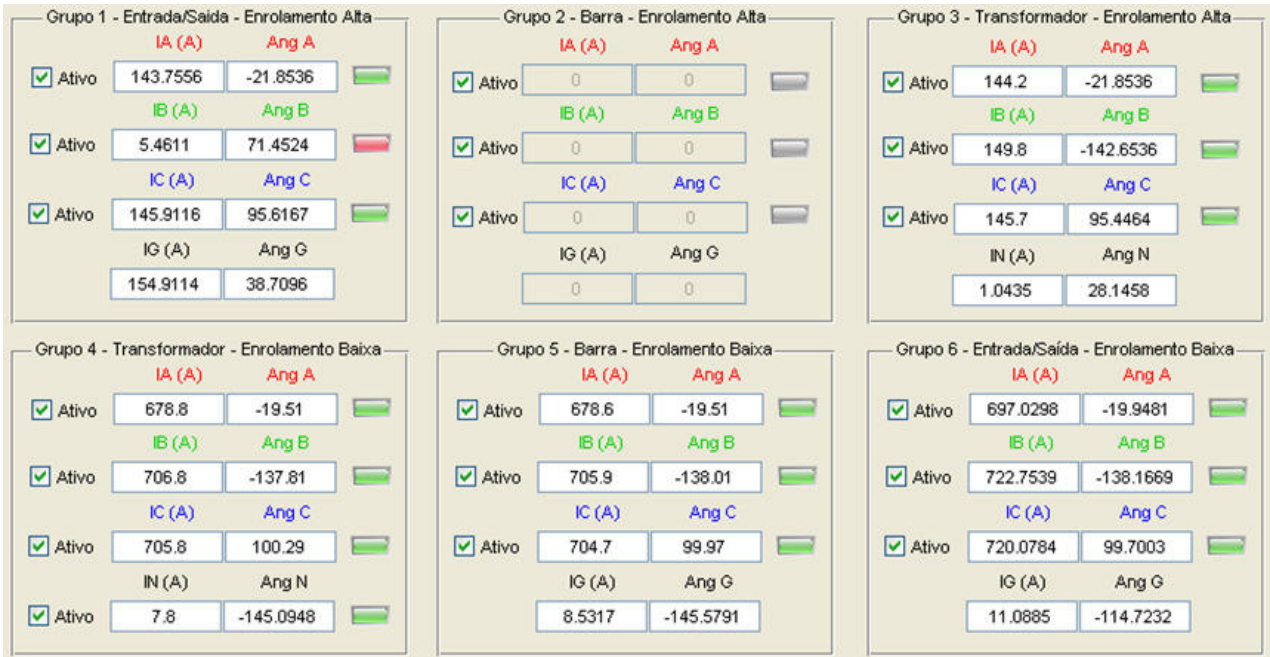


Figura 5.3. Módulo de Sinalização e Medição

Tabela 5.4. Identificação das cores do *led*

LED	Estado
Verde	Normal
Amarelo	Defeito
Vermelho	Falha

Na Figura 5.4 apresenta-se o módulo de comunicação do processo conforme comentado na modelagem da informação. Este módulo é responsável pela conectividade da informação.



Figura 5.4. Módulo de Comunicação do Processo

Na Figura 5.5 apresenta-se o módulo de registro e armazenamento dos dados transformados pelos métodos aplicados.

Pode-se recuperar uma informação para analisar posterior através deste módulo.



Figura 5.5. Módulo de Registro e Armazenamento

Na Figura 5.6 apresenta-se o módulo RNA utilizado para carregar, treinar, executar e parar a rede. Após geração do arquivo de treinamento dos pesos da rede, pode carregá-los sem a necessidade de parar o sistema.

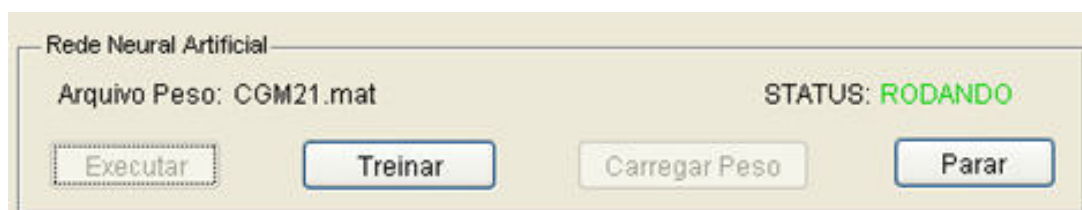


Figura 5.6. Módulo RNA

Na Figura 5.7 apresenta-se o módulo RA no qual se pode aumentar ou diminuir a sensibilidade do sistema. Este módulo é responsável pela detecção da anomalia. Portanto, precisa-se configurá-lo bem para obter os melhores resultados. Adotou-se na redundância analítica direta 5% de tolerância devido a incerteza da instrumentação e 50% na redundância analítica temporal considerando a faixa de operação da subestação.

Redundância Analítica - Por Fase

DIRETA

Direta Fasorial (Entrada e Saída) 5 %
Direta Fasorial (Transformador) 5 %

Direta Fasorial (Barra) 5 %
Direta Fasorial (Rel. Transformação) 5 %

TEMPORAL

Temporal Fasorial (Média Horária) 50 %
Temporal Fase (Delay) 50 %

Redundância Analítica - Entre Fases

DIRETA

Direta Fasorial (Entrada e Saída) 5 %
Direta Fasorial (Transformador) 5 %

Direta Fasorial (Barra) 5 %

TEMPORAL

Temporal Fasorial (Média Horária) 50 %
Temporal Fase (Delay) 50 %

Figura 5.7. Módulo RA

Na Figura 5.8 apresenta-se o módulo de Recuperação de Falha no qual relata as quatro etapas do processo de detecção e diagnóstico da falha. Este módulo sinaliza o que ocorreu para o operador e auxilia-o para tomar uma decisão. Na coluna detectar pode-se ter três eventos: Normal, Defeito e Falha, enquanto na coluna isolar identifica onde está o evento, isto é, em que equipamento. Com isto realizou-se o modelo quantitativo aplicando técnica de redundância analítica. Na coluna identificar tem-se quatro eventos, isto é, gravidade deste evento retratado pelas prioridades. Na coluna corrigir especifica o tempo de atuação que a manutenção para corrigir o problema.

Recuperação de Falha						
	Detectar	Isolar	Identificar	Corrigir	Time Stamp	Frequência
1						
2						
3						
4						

Figura 5.8. Módulo de Recuperação de Falha

5.2.1 Experimentos do Sistema de Recuperação de Falha

Para validação da metodologia proposta, foram realizados 6 estudos de casos na subestação de Maracanã aplicada ao sistema real cujo objetivo é certificar se os resultados estão conforme esperado. Os experimentos realizados simularam perturbações de situações conhecidas e desconhecidas sem prejudicar à parte operacional da subestação, pois é supervisionado continuamente pelo COS.

Para as simulações realizadas adotou-se a seguinte configuração inicial:

Redundância Analítica Direta (Por Fase) - 5%

Redundância Analítica Direta (Entre Fases) - 5%

Redundância Analítica Temporal (Por Fase) - 50%

Redundância Analítica Temporal (Entre Fases) - 50%

Arquivo Peso - treinamento da rede neural

Conexão somente do LabVIEW®

O tempo de amostragem dos dados de entrada foi de 1 segundo, tempo superior do SCADA, porém inferior do relé suficiente para detecção.

Para realização destas simulações, optou-se por testar quatro casos tipicamente distintos, que foram treinados na RNA:

- i) Defeito no TC fase A do disjuntor 12L2 sem atuação da proteção
- ii) Falha no TC fase B do disjuntor 12J1 com atuação proteção
- iii) Defeito no TC fase C do disjuntor 11T1 com atuação da proteção
- iv) Falha no TC fase A do disjuntor 11T1 com atuação proteção

ESTUDO DE CASO 1

Neste estudo de caso, apresenta-se a simulação de um defeito no TC fase A do disjuntor 12L2 sem atuação da proteção. Para realizar esta simulação, a aquisição da informação deste TC não é proveniente do equipamento, e sim, através da inserção do dado pelo sistema. Como a corrente do grupo 1 é a composição de duas correntes conforme relatado anteriormente. A corrente do 12J1 está 403A,

enquanto a corrente do 12L2 está 257A. Foi acrescentada uma corrente no 12L2 até 7% chegando a 275A. A corrente resultante foi 128A como mostra a Figura 5.9.

Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera que a prioridade para este tipo de problema seja P2. A Figura 5.9 mostra o resultado do sistema de recuperação de falha no qual detectou que foi um defeito, isolou informando qual foi o equipamento (12L2) e sua respectiva fase, identificou corretamente pela regra estabelecida no treinamento da RNA e estabeleceu o prazo baseado na prioridade da identificação. O sistema registrou o tempo e frequência que ocorre o evento gerando informações de duração entre falhas e contagem de falha para criticidade. Como foi definido na Tabela 5.4, o *Led* sinalizou amarelo, detectando um defeito na fase A conforme Figura 5.9.



Figura 5.9 Resultado do Caso 1.

ESTUDO DE CASO 2

Neste estudo de caso, será apresentada de forma sucinta a informação do sistema de recuperação de falha através do sinóptico e tabela de recuperação devida aos demais parâmetros não se modificarem.

Simulou uma falha no TC fase B do disjuntor 12J1 com atuação da proteção. Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera que a prioridade para este tipo de problema seja P3. Na Tabela 5.5, mostra o resultado do sistema de recuperação de falha no qual detectou que foi uma falha, isolou informando qual foi o equipamento (12J1) e sua respectiva fase, identificou corretamente pela regra estabelecida no treinamento da RNA e estabeleceu o prazo baseado na prioridade da identificação. Como foi definido na Tabela 5.4, o *Led* sinalizou vermelho, detectando uma falha na fase B conforme Figura 5.10.

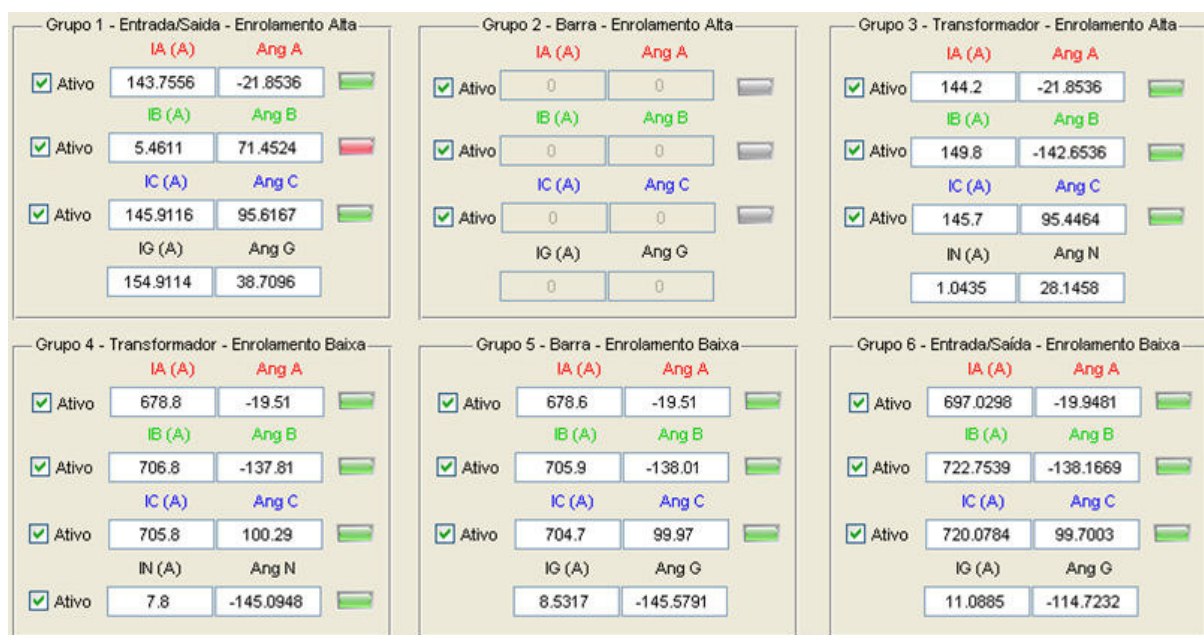


Figura 5.10 Resultado do Sinóptico do Caso 2

Tabela 5.5 – Sistema de Recuperação do Caso 2

Detectar	Isolar	Identificar	Corrigir	Time Stamp	Frequência
Falha	12J1-B	P3	90 dias	10/05/2012 20:46:41.125	1

ESTUDO DE CASO 3

Simulou um defeito no TC fase C do disjuntor 11T1 com atuação da proteção. Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera-se que a prioridade para este tipo de problema seja P4. Na Tabela 5.6, mostra o resultado do sistema de recuperação de falha no qual detectou que foi um defeito, isolou informando qual foi o equipamento (11T1) e sua respectiva fase, identificou corretamente pela regra estabelecida no treinamento da RNA e estabeleceu o prazo baseado na prioridade da identificação. Como foi definido na Tabela 5.4, o *Led* sinalizou amarelo, detectando um defeito na fase C conforme Figura 5.11.

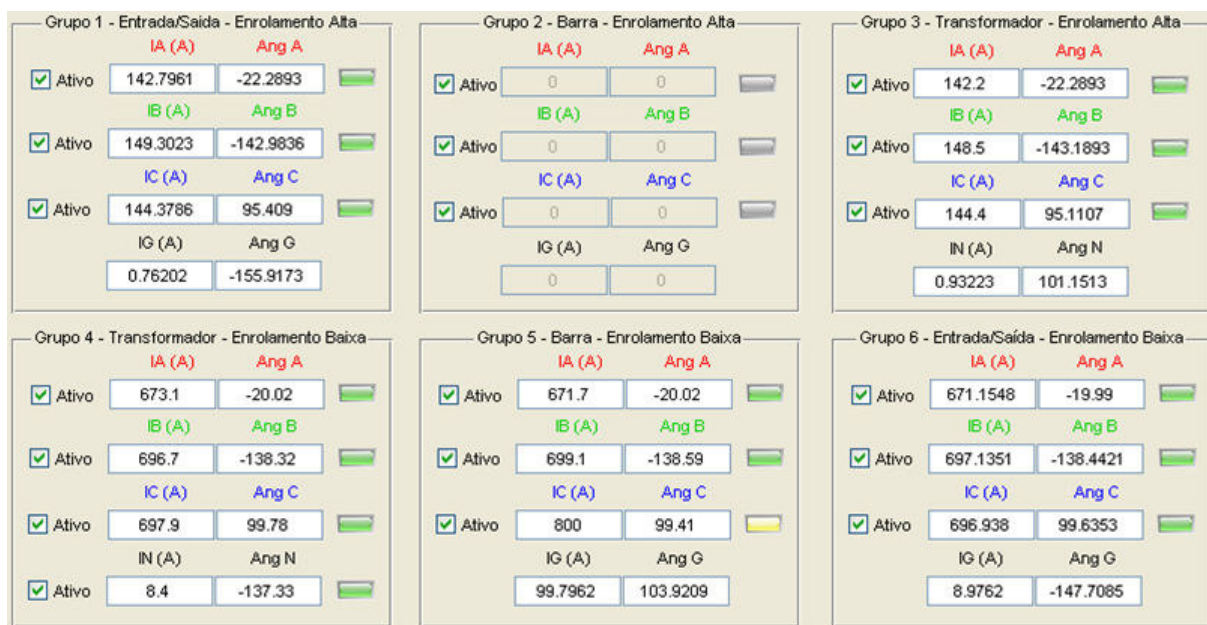


Figura 5.11 Resultado do Sinóptico do Caso 3

Tabela 5.6 – Sistema de Recuperação do Caso 3

Detectar	Isolar	Identificar	Corrigir	Time Stamp	Frequência
Defeito	11T1-C	P4	120 dias	10/05/2012 20:57:41.380	1

ESTUDO DE CASO 4

Com este estudo de caso, pode se verificar 4 cenários diferentes aplicados em equipamentos diferentes, porém todos os casos foram mapeados no conjunto padrão de treinamento. Vale ressaltar que a detecção foi feita para um

equipamento individual, pois onde se tem a maior possibilidade de acontecer. No próximo estudo de caso será feito com mais de um equipamento.

Simulou uma falha no TC fase A do disjuntor 11T1 com atuação da proteção. Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera que a prioridade para este tipo de problema seja P1. Na Tabela 5.7, mostra o resultado do sistema de recuperação de falha no qual detectou que foi uma falha, isolou informando qual foi o equipamento (11T1) e sua respectiva fase, identificou corretamente pela regra estabelecida no treinamento da RNA e estabeleceu o prazo baseado na prioridade da identificação. Como foi definido na Tabela 5.4, o *Led* sinalizou vermelho, detectando um defeito na fase C conforme Figura 5.12.

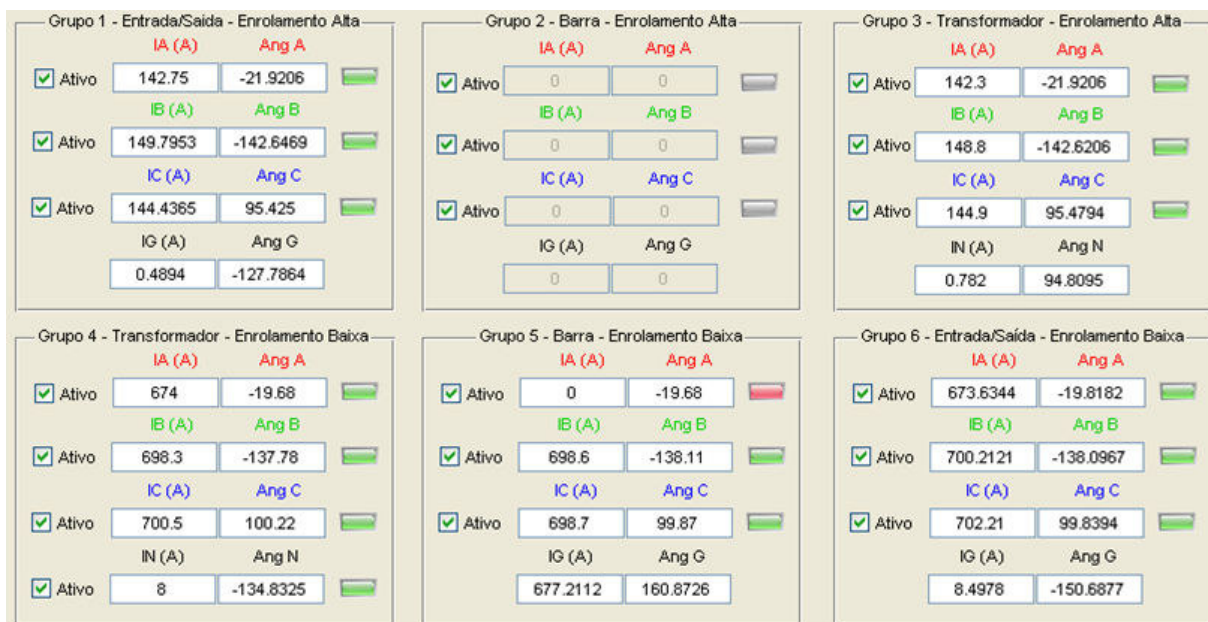


Figura 5.12 Resultado do Sinóptico do Caso 4

Tabela 5.7 – Sistema de Recuperação do Caso 4

Detectar	Isolar	Identificar	Corrigir	Time Stamp	Frequência
Falha	11T1-A	P1	5 dias	10/05/2012 20:02:27.495	1

Para realização destas simulações, optou-se por testar dois casos tipicamente distintos, que não foram treinados na RNA:

- v) Defeito nos TC's fase A dos disjuntores 12L2 e 12J1 sem atuação da proteção.

- vi) Defeito no TC fase A do disjuntor 12L2, falha no TC fase B do disjuntor 11T1, defeito no TC fase C do disjuntor 11C4 com atuação proteção de ambos.

ESTUDO DE CASO 5

Simulou um defeito nos TC's fase A dos disjuntores 12L2 e 12J1 sem atuação da proteção. Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera que a prioridade para este tipo de problema seja P2 para ambos. Na Tabela 5.8, mostra-se o resultado do sistema de recuperação de falha no qual detectou que foi um defeito em ambos os equipamentos, isolou informando quais foram os equipamentos (12J1 e 12L2) e suas respectivas fases, identificou corretamente pela regra estabelecida no treinamento da RNA e estabeleceu o prazo baseado na prioridade da identificação. Não foi previsto no treinamento a atuação de mais de um instrumento com problema, porém a rede se comportou conforme esperado. Como foi definido na Tabela 5.4, o *Led* sinalizou amarelo, detectando um defeito na fase A conforme Figura 5.13. Pode-se considerar este teste difícil pela seguinte complexidade: gerou o defeito em equipamentos do mesmo grupo e fase. Também não foi previsto no conjunto de treinamento esta situação, porém o sistema respondeu conforme o esperado. Este teste consolida o sistema e seus resultados.

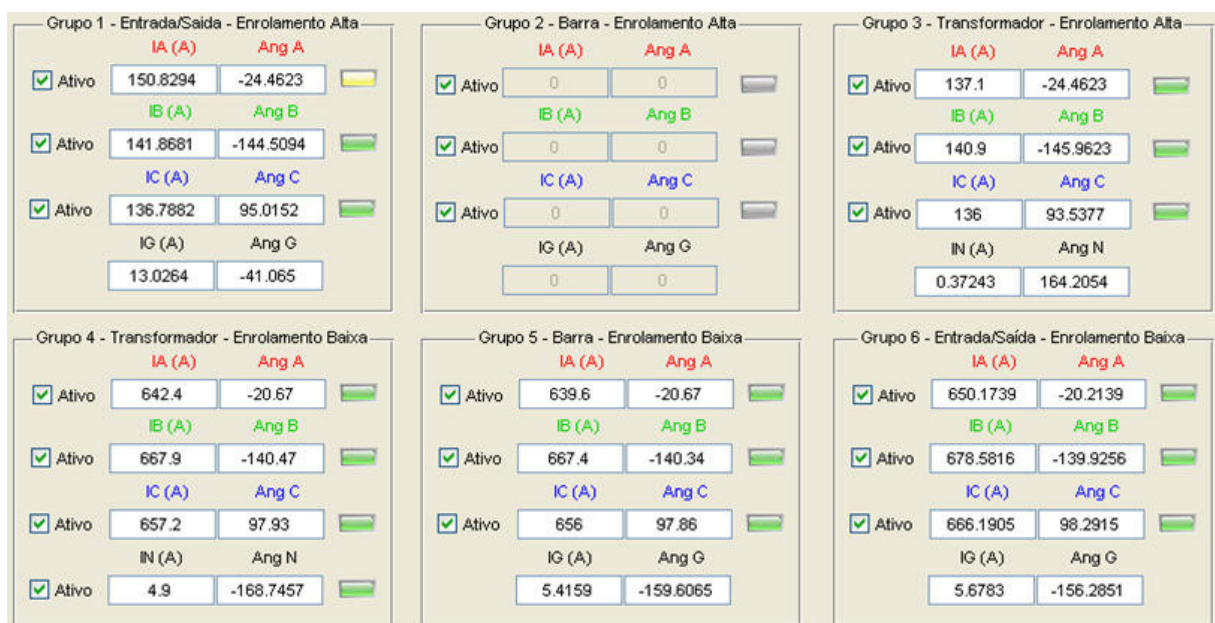


Figura 5.13 Resultado do Sinóptico do Caso 5

Tabela 5.8 – Sistema de Recuperação do Caso 5

Detectar	Isolar	Identificar	Corrigir	Time Stamp	Frequência
Defeito	12J1-A	P2	30 dias	10/05/2012 20:10:35.471	1
Defeito	12L1-A	P2	30 dias	10/05/2012 20:10:35.495	1

ESTUDO DE CASO 6

Simulou um defeito no TC fase A do disjuntor 12J1, uma falha no TC fase B do disjuntor 11T1 e um defeito no TC fase C do disjuntor 11C4 com atuação da proteção nos 3. Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera que a prioridade para este tipo de problema seja P1 para todos. Na Tabela 5.9, mostra-se o resultado do sistema de recuperação de falha no qual detectou um defeito no grupo 1 e grupo 6 e uma falha no grupo 5, isolou informando quais foram os equipamentos (12J1, 11T1 e 11C4) e suas respectivas fases (A, B e C), identificou corretamente pela regra estabelecida no treinamento da RNA e estabeleceu o prazo baseado na prioridade da identificação. Como foi definido na Tabela 5.4, os *Leds* sinalizaram amarelos para o grupo 1 e 6 e vermelho para o grupo 5 conforme Figura 5.14.

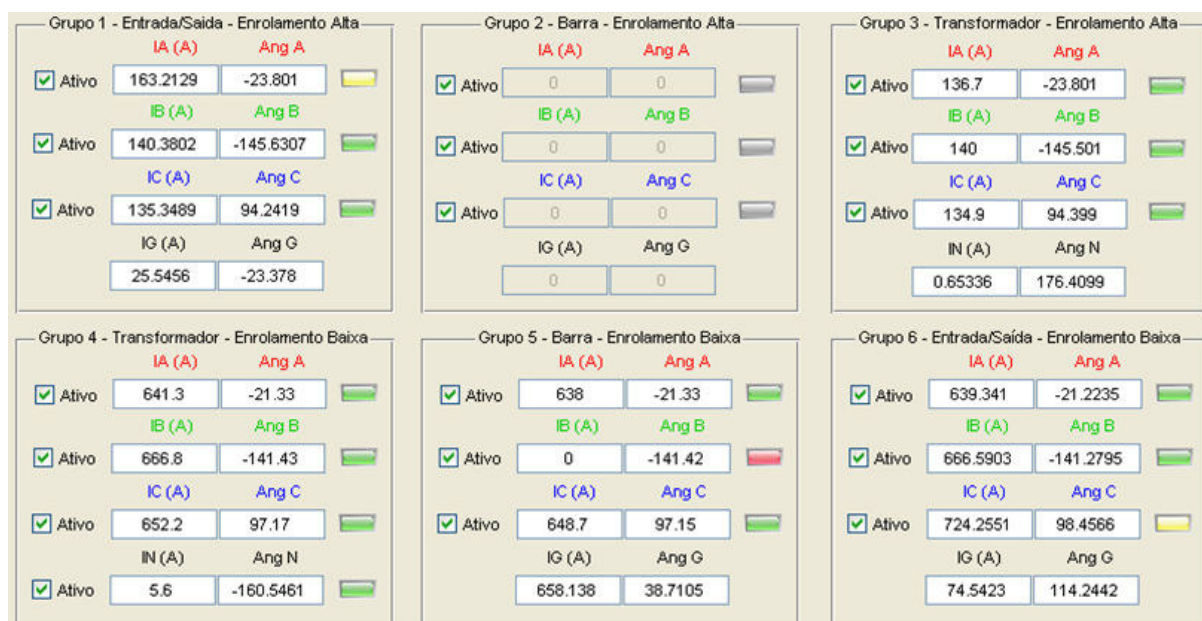


Figura 5.14 Resultado do Sinóptico do Caso 6

Tabela 5.9 Sistema de Recuperação do Caso 6.

Detectar	Isolar	Identificar	Corrigir	Time Stamp	Frequência
Defeito	12J1-A	P1	5 dias	10/05/2012 20:16:05.661	1
Falha	11T1-B	P1	5 dias	10/05/2012 20:16:05.771	1
Defeito	11C4-C	P1	5 dias	10/05/2012 20:16:05.795	1

5.3 RESUMO DOS EXPERIMENTOS

A Tabela 5.10 apresenta um resumo de todas as simulações realizado no sistema de recuperação de falha para validação. Foram realizados em torno de 150 cenários prováveis ou pouco prováveis de acontecer. Em alguns poucos casos, tive uma identificação com prioridade diferente ao desejado, porém esta inconsistência foi por antecipação o que não prejudicaria o resultado final do processo. Para exemplificar, vamos citar o seguinte caso:

Simulou um defeito no TC fase A do disjuntor 11C1 com atuação da proteção do disjuntor 11C2. Pela regra definida no conjunto de treinamento da RNA, espera que a prioridade para este tipo de problema seja P2, porém a prioridade informada foi P1. O Diagnóstico foi incorreto, porém não prejudicaria o sistema, pois anteciparíamos o planejamento.

A resposta da redundância analítica diante as simulações foram muito satisfatórias, pois em todos os testes o sistema detectou e sua detecção foi correta.

Diante dos vários testes, não foram detectado falha falsa ou defeito falsa o que é um resultado bastante expressivo, pois poderíamos comprometer todo o sistema tornando o projeto inviável. O sistema iria mais atrapalhar do que ajuda na tomada de decisão. Outro ponto também importante foi que o sistema conseguiu detectar todas as falhas e defeitos que foram gerados na simulação validando o potencial desta ferramenta. Como foi comentado e explicado, teve alguns diagnósticos incorretos tanto no defeito enquanto na falha, mas isto não inviabiliza o projeto por ter um percentual baixo e não prejudica o sistema conforme relatado.

Tabela 5.10 – Resultado do Sistema de Recuperação da Falha

Evento	Ocorrência
Falha Falsa Detectada	0%
Falha Não detectada	0%
Falha Detectada, Diagnóstico Incorreto	4,25%
Falha Detectada, Diagnóstico Correto	95,75%
Defeito Falso Detectado	0%
Defeito Não detectado	0%
Defeito Detectado, Diagnóstico Incorreto	2,45%
Defeito Detectado, Diagnóstico Correto	97,55%

O trabalho exposto é pioneiro no setor elétrico e poderá ser aplicado em outras subestações de qualquer empresa deste segmento.

Os testes e simulações realizados demonstraram que o sistema de recuperação de falha atende as suas especificações de projeto, funcionando como uma importante ferramenta de suporte à decisão dos operadores e planejador da manutenção do sistema elétrico. Analisando as características de um sistema de diagnóstico de falhas, levamos as seguintes conclusões:

1. **Rápida Detecção e Diagnóstico:** O sistema responde rapidamente a detecção e diagnóstico da falha, pois foi modelado a responder em tempo real e interagir com outros sistemas. O tempo de resposta é de 1 segundo aproximadamente.

2. **Isolabilidade:** O sistema é capaz de identificar diferentes falhas através da RNA.

3. **Robustez:** O sistema foi modelado para ter um sistema robusto através da redundância analítica.

4. **Identificação de Falhas:** O sistema de recuperação de falha detecta se a planta está na condição normal, defeito ou falha.

5. **Classificação do Erro Estimado:** Não foi previsto este requisito na modelagem do sistema.

6. **Adaptabilidade:** O sistema se adapta as mudanças nas entradas ou estruturais do sistema bastando especificar nas condições iniciais.

7. **Facilidade em Explicação:** Este sistema pode ser aplicado a outras plantas com um mínimo de esforço de adaptação.

8. **Requisitos do Sistema Diagnóstico:** O sistema foi desenvolvido levando em consideração estes requisitos através dos métodos quantitativos e qualitativos.

9. **Armazenamento e Poder Computacional:** Este sistema foi integrado a outros deixando somente a atividade afim.

10. **Identificação de Múltiplas Falhas:** Na simulação foram feitos testes e o sistema se comportou bem.

Portanto, das 10 características para um bom sistema DDF atendemos nove com desempenho satisfatório, o que mostra que o sistema foi bem modelado. O único item que não se tem resultado foi à classificação do erro estimado, pois o sistema não está preparado para prever a falha.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o desenvolvimento de um sistema de detecção e diagnóstico de falhas em uma subestação de energia elétrica. Este sistema foi dividido em dois modelos complementares: redundância analítica e rede neural artificial.

Além do desenvolvimento do sistema aplicado a técnica de detecção e diagnóstico de falhas em um sistema dinâmico, o trabalho resultou na expansão do conhecimento em determinadas situações que sensibilizou aos questionamentos antes não compreendidos. Dessa maneira, pode-se interagir de forma mais assertiva numa situação de ocorrências.

Uma deficiência do conjunto peso é a pouca experiência fundamentada na prática de defeitos e falhas para estudos neurais, que só vai ser solucionada com os resultados ao longo do tempo.

A utilização do programa em subestações de potência auxiliará o monitoramento das instrumentações à distância e indicará para o planejamento da manutenção o momento certo em intervir no equipamento, diminuindo o tempo de reparo e o desligamento desnecessário da linha.

Apesar de trazer contribuições e estar bem validada, a proposta ainda pode receber melhorias e adaptações para serem aplicadas a outros tipos de processos. A seguir, alguns pontos para serem desenvolvidos posteriormente como futuros trabalhos:

- Utilizar algoritmos genéticos no método qualitativo e RNA no método quantitativo como forma de comparação para a robustez do sistema
- Devido o armazenamento da informação poderá desenvolver métodos baseados na história do processo utilizando RNA para melhorar a detecção e diagnóstico da falha.

REFERÊNCIAS

- ANGELI, C. & A. CHATZINIKOLAOU. On-line fault detection techniques for technical systems: A survey. **International Journal of Computer Science and Applications**, 2004.
- ARMENGOL, Joaquim; VEHF, Josep; SAINZ, Miguel Angel; HERRERO, Pauj. Fault detection in a pilot plant using interval models and multiple sliding time windows, **Safeprocess:[s.i]**, Washington – USA, p. 729-734, 2003.
- AZEVEDO, F. M.; BRASIL, L. M.; OLIVEIRA, R. C. L. de. **Redes neurais com aplicações em controle e em sistemas especialistas**. Florianópolis: Visual Books Editora, 2000.
- BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora AS, 2000.
- BRICKER, S.; GONEN, T.; RUBIN, L. Substation automation technologies and advantages, In: **Computer Applications in Power**, [S.L]: IEEE, vol.14, 2001.
- HOR, C.L.; CROSSLEY, P.A. Substation event analysis using information from intelligent electronic devices. In: **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Volume 28, Issue 6, 2006.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. São Paulo : Editora Egard Blüher, 9.ed., 2004.
- CARVALHO, A.; LUDEMIR, A. **Fundamentos de redes neurais artificiais: 11ª escola de computação**. São Paulo: Imprinta Gráfica e Editora Ltda, 1998.
- EHRENSPERGER, J.G. **Sistemas de medição fasorial sincronizada: análise do estado da arte e aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica** (Dissertação). Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- FERNANDES, Raphaela Galhardo. **Deteção e isolamento de falhas em sistemas dinâmicos baseados em redes neurais** (Dissertação). Rio Grande do Norte: UFRN, 2007.
- FERREIRA, D.G.; TOLEDO, L.H.S.; NOVAIS, H.S. Experiência da CEMIG na revisão do plano diretor de automação da transmissão, **VISIMPASE**, São Paulo: [s.n], 2005.
- GERTLER, J A survey of model-based failure detection and isolation in complexplants. In: **IEEE Control Systems Magazine**, Vol. 8, 1998.
- GERTLER, Janos J. **Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems**. [s.l]:CRC Press, 1st., 1998.

HAYKIN, Simon. **Neural Networks: a comprehensive Foundation**. USA: Editora Prentice Hall. 2nd edição. Edição em Português: “Redes Neurais - Princípios e Prática”, Bookman, 2001.

HELL, M. B.; D’Angelo, M. F. S. V.; COSTA Jr., P. P. Power Transformer Fault Diagnosis Based in Dissolved Gas Analysis Using a Fuzzy Neural Network Approach. In: **Real Data Base**. VINDUSCON – IEEE International Conference on Industry Application, Advances Information Science and Soft Computing, NY-USA: WEAS Press, 2002.

ISERMANN, Rolf. **Fault-Diagnosis systems an introduction from fault detection to fault tolerance**. [S.L]: Springer, 2006.

JARDINI, J.A. **Sistemas digitais para automação da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edição acadêmica, 1996.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção função estratégica**. Rio de Janeiro : Editora Qualitymark, 1999.

KÖPPEN-SELIGER, B. & P.; FRANK, M. Fault detection and isolation in technical processes with neural networks, In: **Proc. of the 34th Conference on Decision and Control**, [S.L]: [s.n], 1995.

LOU, S.J.; BUDMAN, H.; DUEVER T.A. Comparison of fault detection techniques. In: **Journal of Process Control 13**. [S.L]:[s.n], 2003.

MARTINS, A.J.A.L. et al. Monitoramento e controle “on-line” de equipamentos e subestações. In: **XVII SNPTTE**, Uberlândia: [s.n], 2003.

NAUGHTON, J. M.; Y. C. CHEN& J. JIANG. A neural networks application to fault diagnosis for robotic manipulator Control Applications, 1996. In: **Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on** .1996

PAIVA, Henrique Mohallem. **Deteção de falhas em sistemas dinâmicos empregando transformadas wavelets adaptativas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

PEREIRA, André Edmundo Almeida. **Controle de Sistemas Elétricos de Potência: Uma introdução à Automação**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- CPDEE/Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PERSIN, S.; TOVORNIK, B; MUKINJA N.; VALH, D. Increasing process safety using analytical redundancy. In: **Electrotechnical Review**. [S.L]: [s.n], 2002.

RICH, Elaine; KNIGHT, Kevin. **Artificial intelligence**. 1st edition. [S.L]: editora McGraw Hill, 1991.

SAMPAIO, R. F. **Sistema de diagnóstico de faltas para subestações baseados em redes de petri coloridas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SIMANI, Silvio. Identification and fault diagnosis of a simulated model of an industrial gas turbine, In: **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Vol. 1. [S.L]: [s.n], 2005.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção centrada na confiabilidade**. [S.L]: editora Qualitymark, 2008.

SOUZA, J.C.S., SILVA, A.P.A. Aplicação de redes neurais para a depuração de dados na supervisão em tempo real de sistemas de potência, **Revista Eletrevolução**, 1996.

TINÓS, Renato. **Deteção e diagnóstico de falhas em robôs manipuladores via redes neurais artificiais**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VENKATASUBRAMANIAN, et al. **A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods**. Computers and Chemical Engineering, 2003.

VENKATASUBRAMANIAN, et al. **A review of process fault detection and diagnosis Part II: Qualitative models and search strategies**. Computers and Chemical Engineering, 2003.

WANG, Hongzhou; PHAM, Hoang. **Reliability and optimal maintenance**. London: Springer-Verlag, 2003.

WEBER, Taisy Silva. Um roteiro para exploração dos conceitos básicos de tolerância a falhas. **Relatório técnico**. Porto Alegre (UFRGS): Instituto de Informática, 2002.

WITCZAK, Marcin. Advances in model-based faults diagnosis with evolutionary algorithms and neural networks. In: **J. Appl. Math. Comput. Sci.**, Vol. 16, No. 1, 2006.

ANEXO A - Tipos de Manutenção

Manutenção corretiva é a atuação para a correção da falha ou do desempenho menor que o esperado.

Ao atuar em um equipamento que apresenta um defeito ou um desempenho diferente do esperado estamos fazendo manutenção corretiva. Assim, a manutenção corretiva não é, necessariamente, a manutenção de emergência.

Convém observar que existem duas condições específicas que levam à manutenção corretiva:

- Desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais.
- Ocorrência da falha.

Desse modo a ação principal na Manutenção Corretiva é corrigir ou restaurar as condições de funcionamento do equipamento ou sistema. A manutenção corretiva pode ser dividida em duas classes:

- Manutenção Corretiva Não Planejada.
- Manutenção Corretiva Planejada.

Manutenção corretiva não planejada é a correção da falha de maneira aleatória.

Caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este falha ou um desempenho menor que o esperado. Não há tempo para preparação do serviço. Infelizmente ainda é mais praticado do que deveria.

Normalmente a manutenção corretiva não planejada implica altos custos, pois a quebra inesperada pode acarretar perdas de produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção.

Manutenção corretiva planejada é a correção de desempenho menor que o esperado ou da falha, por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função de acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra.

Um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que um trabalho não planejado. É sempre de melhor qualidade.

Mesmo que a decisão gerencial seja de deixar o equipamento funcionar até a quebra, essa é uma decisão conhecida e algum planejamento pode ser feito quando a falha ocorrer.

Manutenção preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou quebra no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo.

Inversamente à política de manutenção corretiva, a manutenção preventiva procura obstinadamente evitar a ocorrência de falhas, ou seja, procura prevenir.

A manutenção preventiva será tanto mais conveniente quanto maior for a simplicidade na reposição; quanto mais altos forem os custos de falhas; quanto mais falhas prejudicarem a produção e quanto maiores forem as implicações das falhas na segurança pessoal e operacional.

Outro ponto negativo com relação à manutenção preventiva é a introdução de defeitos não existentes no equipamento devido a:

- Falha humana.
- Falha de sobressalentes.
- Contaminações introduzidas no sistema de óleo.
- Danos durante partidas e paradas.
- Falhas dos procedimentos de manutenção.

Manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

Seu objetivo é o de prever as condições dos equipamentos. Ou seja, a manutenção preditiva privilegia a disponibilidade à medida que não promove a intervenção nos equipamentos ou sistemas, pois as medições e verificações são efetuadas com o equipamento produzido.

Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção. Normalmente esse

tipo de acompanhamento permite a preparação prévia do serviço, além de outras decisões e alternativas relacionadas com a produção. De forma mais direta, podemos dizer que a manutenção preditiva prediz as condições dos equipamentos e quando a intervenção é decidida o que se faz, na realidade, é uma manutenção corretiva planejada.

Manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.

Especialistas fazem verificações no sistema, sem tirá-lo de operação, são capazes de detectar falhas ocultas, e preferencialmente podem corrigir a situação, mantendo o sistema operando [Kardec, 1999].

ANEXO B - Classificação da Manutenção

Classificação da manutenção aplicada em subestação:

Manutenção Tipo M1

Inspeção visual, auditiva, olfativa periódica realizada em todos os equipamentos da subestação, sem que haja indisponibilidade operacional do equipamento. A inspeção tem o objetivo de encontrar visualmente defeitos estruturais dos equipamentos assim como ruídos ou odores anormais.

Manutenção Tipo M2

Este tipo de manutenção acarreta na indisponibilidade operacional, porém não requer desmontagem parcial ou total do equipamento / instalação. É estabelecida por períodos fixos (semestral, anual, etc.) e varia para as famílias de equipamentos ou por necessidade constatada na manutenção tipo M1. Realização de ensaios elétricos e mecânicos.

Manutenção Tipo M3

Este tipo de manutenção acarreta a indisponibilidade operacional, com desmontagem parcial ou total do equipamento/instalação, incluindo ou não substituição de peças. A periodicidade pode ser estabelecida considerando os seguintes critérios: número de operações em curto-circuito, número de manobras do sistema, número de operações, períodos fixos ou por necessidade constatada nas manutenções tipos M1 ou M2.

Plano de Manutenção Preventiva

Na execução da inspeção visual, deverão ser registradas e informadas a operação as anomalias observadas em campo. Para cada defeito apontado, deverá ser atribuído o correspondente grau de prioridade para programação dos serviços. O inspetor avalia essa prioridade com base na gravidade do defeito e das definições na tabela abaixo:

Tabela B.1 – Definição das Prioridades

PRIORIDADE	DEFINIÇÃO
P1	ANOMALIAS CRÍTICAS DE RÁPIDA EVOLUÇÃO QUE PODEM TIRAR O SISTEMA A QUALQUER MOMENTO
P2	ANOMALIAS QUE EVOLUEM RAPIDAMENTE PARA PRIORIDADE 1 / SEGURANÇA
P3	ANOMALIAS DE EVOLUÇÃO LENTA QUE PODEM EVOLUIR PARA P2 / ACOMPANHAR
P4	ANOMALIAS SEM EVOLUÇÃO OU EVOLUÇÃO MUITO LENTA / REGISTRO

Prazos para a retirada dessas anomalias são os seguintes:

Tabela B.2 – Prazo para Retirada da Anomalia

PRIORIDADE	PRAZO PARA A RETIRADA DA ANOMALIA
P1	IMEDIATO
P2	30 DIAS
P3	90 DIAS E/OU ACOMPANHAR
P4	120 DIAS E/OU REGISTRAR

ANEXO C - Método Baseado em Modelos

Modelos Quantitativos

Este anexo especifica todos os elementos de transformação do espaço de recurso para o espaço de decisão e do espaço de decisão para o espaço de classe.

- Elementos do Espaço de Decisão:

- Decisão Por Fase:

i) Decisão Direta Fasorial (Fase A)

$$d_3 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5A} - I_{G6A}| \leq \frac{5}{100} I_{G5A} \\ 1 & \text{se } |I_{G5A} - I_{G6A}| > \frac{5}{100} I_{G5A} \end{cases}$$

$$d_4 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6A} - I_{G4A}| \leq \frac{5}{100} I_{G6A} \\ 1 & \text{se } |I_{G6A} - I_{G4A}| > \frac{5}{100} I_{G6A} \end{cases}$$

$$d_5 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1A} - FT * I_{G4A}| \leq \frac{5}{100} I_{G1A} \\ 1 & \text{se } |I_{G1A} - FT * I_{G4A}| > \frac{5}{100} I_{G1A} \end{cases}$$

$$d_6 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1A} - FT * I_{G5A}| \leq \frac{5}{100} I_{G1A} \\ 1 & \text{se } |I_{G1A} - FT * I_{G5A}| > \frac{5}{100} I_{G1A} \end{cases}$$

$$d_7 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1A} - FT * I_{G6A}| \leq \frac{5}{100} I_{G1A} \\ 1 & \text{se } |I_{G1A} - FT * I_{G6A}| > \frac{5}{100} I_{G1A} \end{cases}$$

$$d_8 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3A} - FT * I_{G4A}| \leq \frac{5}{100} I_{G4A} \\ 1 & \text{se } |I_{G3A} - FT * I_{G4A}| > \frac{5}{100} I_{G4A} \end{cases}$$

$$d_9 = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3A} - FT * I_{G5A}| \leq \frac{5}{100} I_{G3A} \\ 1 & \text{se } |I_{G3A} - FT * I_{G5A}| > \frac{5}{100} I_{G3A} \end{cases}$$

$$d_{10} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3A} - FT * I_{G6A}| \leq \frac{5}{100} I_{G3A} \\ 1 & \text{se } |I_{G3A} - FT * I_{G6A}| > \frac{5}{100} I_{G3A} \end{cases}$$

ii) Decisão Temporal Fasorial *Delay* (Fase A)

$$d_{12} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3A}(t) - I_{G3A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G3A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G3A}(t) - I_{G3A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G3A}(t) \end{cases}$$

$$d_{13} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4A}(t) - I_{G4A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G4A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G4A}(t) - I_{G4A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G4A}(t) \end{cases}$$

$$d_{14} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5A}(t) - I_{G5A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G5A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G5A}(t) - I_{G5A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G5A}(t) \end{cases}$$

$$d_{15} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6A}(t) - I_{G6A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G6A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G6A}(t) - I_{G6A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G6A}(t) \end{cases}$$

iii) Decisão Temporal Fasorial Média Horária(Fase A)

$$d_{17} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3A} - \overline{I_{G3A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G3A}} \\ 1 & \text{se } |I_{G3A} - \overline{I_{G3A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G3A}} \end{cases}$$

$$d_{18} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4A} - \overline{I_{G4A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G4A}} \\ 1 & \text{se } |I_{G4A} - \overline{I_{G4A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G4A}} \end{cases}$$

$$d_{19} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5A} - \overline{I_{G5A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G5A}} \\ 1 & \text{se } |I_{G5A} - \overline{I_{G5A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G5A}} \end{cases}$$

$$d_{20} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6A} - \overline{I_{G6A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G6A}} \\ 1 & \text{se } |I_{G6A} - \overline{I_{G6A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G6A}} \end{cases}$$

iv) Decisão Direta Fasorial (Fase B)

$$d_{21} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3B} - I_{G1B}| \leq \frac{5}{100} I_{G3B} \\ 1 & \text{se } |I_{G3B} - I_{G1B}| > \frac{5}{100} I_{G3B} \end{cases}$$

$$d_{22} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4B} - I_{G5B}| \leq \frac{5}{100} I_{G4B} \\ 1 & \text{se } |I_{G4B} - I_{G5B}| > \frac{5}{100} I_{G4B} \end{cases}$$

$$d_{23} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G5B} - I_{G6B}| \leq \frac{5}{100} I_{G5B} \\ 1 \text{ se } |I_{G5B} - I_{G6B}| > \frac{5}{100} I_{G5B} \end{cases}$$

$$d_{24} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G6B} - I_{G4B}| \leq \frac{5}{100} I_{G6B} \\ 1 \text{ se } |I_{G6B} - I_{G4B}| > \frac{5}{100} I_{G6B} \end{cases}$$

$$d_{25} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G1B} - FT * I_{G4B}| \leq \frac{5}{100} I_{G1B} \\ 1 \text{ se } |I_{G1B} - FT * I_{G4B}| > \frac{5}{100} I_{G1B} \end{cases}$$

$$d_{26} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G1B} - FT * I_{G5B}| \leq \frac{5}{100} I_{G1B} \\ 1 \text{ se } |I_{G1B} - FT * I_{G5B}| > \frac{5}{100} I_{G1B} \end{cases}$$

$$d_{27} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G1B} - FT * I_{G6B}| \leq \frac{5}{100} I_{G1B} \\ 1 \text{ se } |I_{G1B} - FT * I_{G6B}| > \frac{5}{100} I_{G1B} \end{cases}$$

$$d_{28} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G3B} - FT * I_{G4B}| \leq \frac{5}{100} I_{G4B} \\ 1 \text{ se } |I_{G3B} - FT * I_{G4B}| > \frac{5}{100} I_{G4B} \end{cases}$$

$$d_{29} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G3B} - FT * I_{G5B}| \leq \frac{5}{100} I_{G3B} \\ 1 \text{ se } |I_{G3B} - FT * I_{G5B}| > \frac{5}{100} I_{G3B} \end{cases}$$

$$d_{30} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G3B} - FT * I_{G6B}| \leq \frac{5}{100} I_{G3B} \\ 1 \text{ se } |I_{G3B} - FT * I_{G6B}| > \frac{5}{100} I_{G3B} \end{cases}$$

v) Decisão Temporal Fasorial Delay (Fase B)

$$d_{31} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G1B}(t) - I_{G1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G1B}(t) \\ 1 \text{ se } |I_{G1B}(t) - I_{G1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{32} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G3B}(t) - I_{G3B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G3B}(t) \\ 1 \text{ se } |I_{G3B}(t) - I_{G3B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G3B}(t) \end{cases}$$

$$d_{33} = \begin{cases} 0 \text{ se } |I_{G4B}(t) - I_{G4B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G4B}(t) \\ 1 \text{ se } |I_{G4B}(t) - I_{G4B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G4B}(t) \end{cases}$$

$$d_{34} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5B}(t) - I_{G5B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G5B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G5B}(t) - I_{G5B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G5B}(t) \end{cases}$$

$$d_{35} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6B}(t) - I_{G6B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G6B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G6B}(t) - I_{G6B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G6B}(t) \end{cases}$$

vi) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Fase B)

$$d_{36} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1B} - \overline{I_{G1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{G1B} - \overline{I_{G1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G1B}} \end{cases}$$

$$d_{37} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3B} - \overline{I_{G3B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G3B}} \\ 1 & \text{se } |I_{G3B} - \overline{I_{G3B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G3B}} \end{cases}$$

$$d_{38} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4B} - \overline{I_{G4B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G4B}} \\ 1 & \text{se } |I_{G4B} - \overline{I_{G4B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G4B}} \end{cases}$$

$$d_{39} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5B} - \overline{I_{G5B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G5B}} \\ 1 & \text{se } |I_{G5B} - \overline{I_{G5B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G5B}} \end{cases}$$

$$d_{40} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6B} - \overline{I_{G6B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G6B}} \\ 1 & \text{se } |I_{G6B} - \overline{I_{G6B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G6B}} \end{cases}$$

vii) Decisão Direta Fasorial (Fase C)

$$d_{41} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3C} - I_{G1C}| \leq \frac{5}{100} I_{G3C} \\ 1 & \text{se } |I_{G3C} - I_{G1C}| > \frac{5}{100} I_{G3C} \end{cases}$$

$$d_{42} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4C} - I_{G5C}| \leq \frac{5}{100} I_{G4C} \\ 1 & \text{se } |I_{G4C} - I_{G5C}| > \frac{5}{100} I_{G4C} \end{cases}$$

$$d_{43} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5C} - I_{G6C}| \leq \frac{5}{100} I_{G5C} \\ 1 & \text{se } |I_{G5C} - I_{G6C}| > \frac{5}{100} I_{G5C} \end{cases}$$

$$d_{44} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6C} - I_{G4C}| \leq \frac{5}{100} I_{G6C} \\ 1 & \text{se } |I_{G6C} - I_{G4C}| > \frac{5}{100} I_{G6C} \end{cases}$$

$$d_{45} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1C} - FT * I_{G4C}| \leq \frac{5}{100} I_{G1C} \\ 1 & \text{se } |I_{G1C} - FT * I_{G4C}| > \frac{5}{100} I_{G1C} \end{cases} \quad d_{46} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1C} - FT * I_{G5C}| \leq \frac{5}{100} I_{G1C} \\ 1 & \text{se } |I_{G1C} - FT * I_{G5C}| > \frac{5}{100} I_{G1C} \end{cases}$$

$$d_{47} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1C} - FT * I_{G6C}| \leq \frac{5}{100} I_{G1C} \\ 1 & \text{se } |I_{G1C} - FT * I_{G6C}| > \frac{5}{100} I_{G1C} \end{cases} \quad d_{48} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3C} - FT * I_{G4C}| \leq \frac{5}{100} I_{G4C} \\ 1 & \text{se } |I_{G3C} - FT * I_{G4C}| > \frac{5}{100} I_{G4C} \end{cases}$$

$$d_{49} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3C} - FT * I_{G5C}| \leq \frac{5}{100} I_{G3C} \\ 1 & \text{se } |I_{G3C} - FT * I_{G5C}| > \frac{5}{100} I_{G3C} \end{cases} \quad d_{50} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3C} - FT * I_{G6C}| \leq \frac{5}{100} I_{G3C} \\ 1 & \text{se } |I_{G3C} - FT * I_{G6C}| > \frac{5}{100} I_{G3C} \end{cases}$$

viii) Decisão Temporal Fasorial Delay (Fase C)

$$d_{51} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1C}(t) - I_{G1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G1C}(t) - I_{G1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G1C}(t) \end{cases}$$

$$d_{52} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3C}(t) - I_{G3C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G3C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G3C}(t) - I_{G3C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G3C}(t) \end{cases}$$

$$d_{53} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4C}(t) - I_{G4C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G4C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G4C}(t) - I_{G4C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G4C}(t) \end{cases}$$

$$d_{54} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5C}(t) - I_{G5C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G5C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G5C}(t) - I_{G5C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G5C}(t) \end{cases}$$

$$d_{55} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6C}(t) - I_{G6C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{G6C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{G6C}(t) - I_{G6C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{G6C}(t) \end{cases}$$

ix) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Fase C)

$$d_{56} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G1C} - \overline{I_{G1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{G1C} - \overline{I_{G1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G1C}} \end{cases}$$

$$d_{57} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G3C} - \overline{I_{G3C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G3C}} \\ 1 & \text{se } |I_{G3C} - \overline{I_{G3C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G3C}} \end{cases}$$

$$d_{58} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G4C} - \overline{I_{G4C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G4C}} \\ 1 & \text{se } |I_{G4C} - \overline{I_{G4C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G4C}} \end{cases}$$

$$d_{59} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G5C} - \overline{I_{G5C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G5C}} \\ 1 & \text{se } |I_{G5C} - \overline{I_{G5C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G5C}} \end{cases}$$

$$d_{60} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{G6C} - \overline{I_{G6C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{G6C}} \\ 1 & \text{se } |I_{G6C} - \overline{I_{G6C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{G6C}} \end{cases}$$

- Decisão Entre Fases:

x) Decisão Direta Fasorial (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 e Disjuntor 12L1)

$$d_{62} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1B} - I_{12J1C}| \leq \frac{5}{100} I_{12J1B} \\ 1 & \text{se } |I_{12J1B} - I_{12J1C}| > \frac{5}{100} I_{12J1B} \end{cases}$$

$$d_{63} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1C} - I_{12J1A}| \leq \frac{5}{100} I_{12J1C} \\ 1 & \text{se } |I_{12J1C} - I_{12J1A}| > \frac{5}{100} I_{12J1C} \end{cases}$$

$$d_{65} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1B} - I_{12L1C}| \leq \frac{5}{100} I_{12L1B} \\ 1 & \text{se } |I_{12L1B} - I_{12L1C}| > \frac{5}{100} I_{12L1B} \end{cases}$$

$$d_{66} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1C} - I_{12L1A}| \leq \frac{5}{100} I_{12L1C} \\ 1 & \text{se } |I_{12L1C} - I_{12L1A}| > \frac{5}{100} I_{12L1C} \end{cases}$$

xi) Decisão Direta Fasorial (Grupo 3 – Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_{67} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1A} - I_{02T1B}| \leq \frac{5}{100} I_{02T1A} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1A} - I_{02T1B}| > \frac{5}{100} I_{02T1A} \end{cases}$$

$$d_{68} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1B} - I_{02T1C}| \leq \frac{5}{100} I_{02T1B} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1B} - I_{02T1C}| > \frac{5}{100} I_{02T1B} \end{cases}$$

$$d_{69} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1C} - I_{02T1A}| \leq \frac{5}{100} I_{02T1C} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1C} - I_{02T1A}| > \frac{5}{100} I_{02T1C} \end{cases}$$

xii) Decisão Direta Fasorial (Grupo 4 – Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{70} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1A} - I_{02T1B}| \leq \frac{5}{100} I_{02T1A} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1A} - I_{02T1B}| > \frac{5}{100} I_{02T1A} \end{cases} \quad d_{71} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1B} - I_{02T1C}| \leq \frac{5}{100} I_{02T1B} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1B} - I_{02T1C}| > \frac{5}{100} I_{02T1B} \end{cases}$$

$$d_{72} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1C} - I_{02T1A}| \leq \frac{5}{100} I_{02T1C} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1C} - I_{02T1A}| > \frac{5}{100} I_{02T1C} \end{cases}$$

xiii) Decisão Direta Fasorial (Grupo 5 – Disjuntor 11T1)

$$d_{73} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1A} - I_{11T1B}| \leq \frac{5}{100} I_{11T1A} \\ 1 & \text{se } |I_{11T1A} - I_{11T1B}| > \frac{5}{100} I_{11T1A} \end{cases} \quad d_{74} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1B} - I_{11T1C}| \leq \frac{5}{100} I_{11T1B} \\ 1 & \text{se } |I_{11T1B} - I_{11T1C}| > \frac{5}{100} I_{11T1B} \end{cases}$$

$$d_{75} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1C} - I_{11T1A}| \leq \frac{5}{100} I_{11T1C} \\ 1 & \text{se } |I_{11T1C} - I_{11T1A}| > \frac{5}{100} I_{11T1C} \end{cases}$$

xiv) Decisão Direta Fasorial (Grupo 6 - Disjuntor 11C1, Disjuntor 11C2, Disjuntor 11C3 e Disjuntor 11C4)

$$d_{76} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1A} - I_{11C1B}| \leq \frac{5}{100} I_{11C1A} \\ 1 & \text{se } |I_{11C1A} - I_{11C1B}| > \frac{5}{100} I_{11C1A} \end{cases} \quad d_{77} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1B} - I_{11C1C}| \leq \frac{5}{100} I_{11C1B} \\ 1 & \text{se } |I_{11C1B} - I_{11C1C}| > \frac{5}{100} I_{11C1B} \end{cases}$$

$$d_{78} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1C} - I_{11C1A}| \leq \frac{5}{100} I_{11C1C} \\ 1 & \text{se } |I_{11C1C} - I_{11C1A}| > \frac{5}{100} I_{11C1C} \end{cases} \quad d_{79} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2A} - I_{11C2B}| \leq \frac{5}{100} I_{11C2A} \\ 1 & \text{se } |I_{11C2A} - I_{11C2B}| > \frac{5}{100} I_{11C2A} \end{cases}$$

$$d_{80} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2B} - I_{11C2C}| \leq \frac{5}{100} I_{11C2B} \\ 1 & \text{se } |I_{11C2B} - I_{11C2C}| > \frac{5}{100} I_{11C2B} \end{cases} \quad d_{81} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2C} - I_{11C2A}| \leq \frac{5}{100} I_{11C2C} \\ 1 & \text{se } |I_{11C2C} - I_{11C2A}| > \frac{5}{100} I_{11C2C} \end{cases}$$

$$d_{82} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3A} - I_{11C3B}| \leq \frac{5}{100} I_{11C3A} \\ 1 & \text{se } |I_{11C3A} - I_{11C3B}| > \frac{5}{100} I_{11C3A} \end{cases} \quad d_{83} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3B} - I_{11C3C}| \leq \frac{5}{100} I_{11C3B} \\ 1 & \text{se } |I_{11C3B} - I_{11C3C}| > \frac{5}{100} I_{11C3B} \end{cases}$$

$$d_{84} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3C} - I_{11C3A}| \leq \frac{5}{100} I_{11C3C} \\ 1 & \text{se } |I_{11C3C} - I_{11C3A}| > \frac{5}{100} I_{11C3C} \end{cases} \quad d_{85} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4A} - I_{11C4B}| \leq \frac{5}{100} I_{11C4A} \\ 1 & \text{se } |I_{11C4A} - I_{11C4B}| > \frac{5}{100} I_{11C4A} \end{cases}$$

$$d_{86} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4B} - I_{11C4C}| \leq \frac{5}{100} I_{11C4B} \\ 1 & \text{se } |I_{11C4B} - I_{11C4C}| > \frac{5}{100} I_{11C4B} \end{cases} \quad d_{87} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4C} - I_{11C4A}| \leq \frac{5}{100} I_{11C4C} \\ 1 & \text{se } |I_{11C4C} - I_{11C4A}| > \frac{5}{100} I_{11C4C} \end{cases}$$

xv) Decisão Temporal Fasorial Delay (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 e Disjuntor 12L1)

$$d_{89} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1B}(t) - I_{12J1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{12J1B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{12J1B}(t) - I_{12J1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{12J1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{90} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1C}(t) - I_{12J1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{12J1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{12J1C}(t) - I_{12J1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{12J1C}(t) \end{cases}$$

$$d_{91} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1A}(t) - I_{12L1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{12L1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{12L1A}(t) - I_{12L1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{12L1A}(t) \end{cases}$$

$$d_{92} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1B}(t) - I_{12L1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{12L1B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{12L1B}(t) - I_{12L1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{12L1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{93} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1C}(t) - I_{12L1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{12L1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{12L1C}(t) - I_{12L1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{12L1C}(t) \end{cases}$$

xvi) Decisão Temporal Fasorial Delay (Grupo 3 – Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_{94} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1A}(t) - I_{02T1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{02T1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{02T1A}(t) - I_{02T1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{02T1A}(t) \end{cases}$$

$$d_{95} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1B}(t) - I_{02T1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{02T1B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{02T1B}(t) - I_{02T1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{02T1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{96} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1C}(t) - I_{02T1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{02T1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{02T1C}(t) - I_{02T1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{02T1C}(t) \end{cases}$$

xvii) Decisão Temporal Fasorial Delay (Grupo 4 – Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{97} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1A}(t) - I_{02T1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{02T1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{02T1A}(t) - I_{02T1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{02T1A}(t) \end{cases}$$

$$d_{98} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1B}(t) - I_{02T1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{02T1B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{02T1B}(t) - I_{02T1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{02T1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{99} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1C}(t) - I_{02T1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{02T1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{02T1C}(t) - I_{02T1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{02T1C}(t) \end{cases}$$

xviii) Decisão Temporal Fasorial Delay (Grupo 5 – Disjuntor 11T1)

$$d_{100} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1A}(t) - I_{11T1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11T1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11T1A}(t) - I_{11T1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11T1A}(t) \end{cases}$$

$$d_{101} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1B}(t) - I_{11T1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11T1B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11T1B}(t) - I_{11T1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11T1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{102} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1C}(t) - I_{11T1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11T1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11T1C}(t) - I_{11T1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11T1C}(t) \end{cases}$$

xix) Decisão Temporal Fasorial Delay (Grupo 6 - Disjuntor 11C1, Disjuntor 11C2, Disjuntor 11C3 e Disjuntor 11C4)

$$d_{103} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1A}(t) - I_{11C1B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C1A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C1A}(t) - I_{11C1B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C1A}(t) \end{cases}$$

$$d_{104} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1B}(t) - I_{11C1C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C1B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C1B}(t) - I_{11C1C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C1B}(t) \end{cases}$$

$$d_{105} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1C}(t) - I_{11C1A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C1C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C1C}(t) - I_{11C1A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C1C}(t) \end{cases}$$

$$d_{106} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2A}(t) - I_{11C2B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C2A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C2A}(t) - I_{11C2B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C2A}(t) \end{cases}$$

$$d_{107} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2B}(t) - I_{11C2C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C2B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C2B}(t) - I_{11C2C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C2B}(t) \end{cases}$$

$$d_{108} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2C}(t) - I_{11C2A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C2C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C2C}(t) - I_{11C2A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C2C}(t) \end{cases}$$

$$d_{109} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3A}(t) - I_{11C3B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C3A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C3A}(t) - I_{11C3B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C3A}(t) \end{cases}$$

$$d_{110} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3B}(t) - I_{11C3C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C3B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C3B}(t) - I_{11C3C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C3B}(t) \end{cases}$$

$$d_{111} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3C}(t) - I_{11C3A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C3C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C3C}(t) - I_{11C3A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C3C}(t) \end{cases}$$

$$d_{112} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4A}(t) - I_{11C4B}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C4A}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C4A}(t) - I_{11C4B}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C4A}(t) \end{cases}$$

$$d_{113} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4B}(t) - I_{11C4C}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C4B}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C4B}(t) - I_{11C4C}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C4B}(t) \end{cases}$$

$$d_{114} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4C}(t) - I_{11C4A}(t-1)| \leq \frac{5}{100} I_{11C4C}(t) \\ 1 & \text{se } |I_{11C4C}(t) - I_{11C4A}(t-1)| > \frac{5}{100} I_{11C4C}(t) \end{cases}$$

xx) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 e Disjuntor 12L1)

$$d_{116} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1B} - \overline{I_{12J1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{12J1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{12J2B} - \overline{I_{12J1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{12J1C}} \end{cases} \quad d_{117} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12J1C} - \overline{I_{12J1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{12J1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{12J1C} - \overline{I_{12J1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{12J1A}} \end{cases}$$

$$d_{118} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1A} - \overline{I_{12L1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{12L1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{12L1A} - \overline{I_{12L1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{12L1B}} \end{cases} \quad d_{119} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1B} - \overline{I_{12L1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{12L1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{12L1B} - \overline{I_{12L1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{12L1C}} \end{cases}$$

$$d_{120} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{12L1C} - \overline{I_{12L1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{12L1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{12L1C} - \overline{I_{12L1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{12L1A}} \end{cases}$$

xxi) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Grupo 3 - Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_{121} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1A} - \overline{I_{02T1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{02T1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1A} - \overline{I_{02T1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{02T1B}} \end{cases} \quad d_{122} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1B} - \overline{I_{02T1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{02T1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1B} - \overline{I_{02T1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{02T1C}} \end{cases}$$

$$d_{123} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1C} - \overline{I_{02T1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{02T1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1C} - \overline{I_{02T1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{02T1A}} \end{cases}$$

xxii) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Grupo 4 - Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{124} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1A} - \overline{I_{02T1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{02T1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1A} - \overline{I_{02T1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{02T1B}} \end{cases} \quad d_{125} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1B} - \overline{I_{02T1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{02T1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1B} - \overline{I_{02T1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{02T1C}} \end{cases}$$

$$d_{126} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{02T1C} - \overline{I_{02T1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{02T1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{02T1C} - \overline{I_{02T1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{02T1A}} \end{cases}$$

xxiii) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Grupo 5 – Disjuntor 11T1)

$$d_{127} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1A} - \overline{I_{11T1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11T1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{11T1A} - \overline{I_{11T1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11T1B}} \end{cases} \quad d_{128} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1B} - \overline{I_{11T1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11T1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{11T1B} - \overline{I_{11T1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11T1C}} \end{cases}$$

$$d_{129} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11T1C} - \overline{I_{11T1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11T1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{11T1C} - \overline{I_{11T1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11T1A}} \end{cases}$$

xxiv) Decisão Temporal Fasorial Média Horária (Grupo 6 – Disjuntor 11C1, Disjuntor 11C2, Disjuntor 11C3 e Disjuntor 11C4)

$$d_{130} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1A} - \overline{I_{11C1B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C1B}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C1A} - \overline{I_{11C1B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C1B}} \end{cases} \quad d_{131} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1B} - \overline{I_{11C1C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C1C}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C1B} - \overline{I_{11C1C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C1C}} \end{cases}$$

$$d_{132} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C1C} - \overline{I_{11C1A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C1A}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C1C} - \overline{I_{11C1A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C1A}} \end{cases} \quad d_{133} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2A} - \overline{I_{11C2B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C2B}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C2A} - \overline{I_{11C2B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C2B}} \end{cases}$$

$$d_{134} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2B} - \overline{I_{11C2C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C2C}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C2B} - \overline{I_{11C2C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C2C}} \end{cases} \quad d_{135} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C2C} - \overline{I_{11C2A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C2A}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C2C} - \overline{I_{11C2A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C2A}} \end{cases}$$

$$d_{136} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3A} - \overline{I_{11C3B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C3B}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C3A} - \overline{I_{11C3B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C3B}} \end{cases} \quad d_{137} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3B} - \overline{I_{11C3C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C3C}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C3B} - \overline{I_{11C3C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C3C}} \end{cases}$$

$$d_{138} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C3C} - \overline{I_{11C3A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C3A}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C3C} - \overline{I_{11C3A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C3A}} \end{cases} \quad d_{139} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4A} - \overline{I_{11C4B}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C4B}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C4A} - \overline{I_{11C4B}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C4B}} \end{cases}$$

$$d_{140} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4B} - \overline{I_{11C4C}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C4C}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C4B} - \overline{I_{11C4C}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C4C}} \end{cases} \quad d_{141} = \begin{cases} 0 & \text{se } |I_{11C4C} - \overline{I_{11C4A}}| \leq \frac{5}{100} \overline{I_{11C4A}} \\ 1 & \text{se } |I_{11C4C} - \overline{I_{11C4A}}| > \frac{5}{100} \overline{I_{11C4A}} \end{cases}$$

- Elementos do Espaço de Classe:

i) Redundância Analítica Defeito (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 – Fase B)

Por Fase: $PF_3 = AND(d_{21}, d_{25}, d_{26}, d_{27});$

Entre Fases: $EF_3 = AND(d_{61}, d_{62});$

$c_3 = AND(PF_3, EF_3);$

ii) Redundância Analítica Falha (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 – Fase B)

Por Fase: $PF_4 = OR(AND(d_{21}, d_{25}, d_{26}, d_{27}, d_{31}), AND(d_{21}, d_{25}, d_{26}, d_{27}, d_{36}));$

Entre Fases: $EF_4 = OR(AND(d_{61}, d_{62}, d_{88}, d_{89}), AND(d_{61}, d_{62}, d_{115}, d_{116}));$

$c_4 = AND(PF_4, EF_4);$

iii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 1 - Disjuntor 12J1 – Fase C)

$$\text{Por Fase: } PF_5 = AND(d_{41}, d_{45}, d_{46}, d_{47});$$

$$\text{Entre Fases: } EF_5 = AND(d_{62}, d_{63});$$

$$c_5 = AND(PF_5, EF_5);$$

iv) Redundância Analítica Falha (Grupo1 - Disjuntor 12J1 – Fase C)

$$\text{Por Fase: } PF_6 = OR(AND(d_{41}, d_{45}, d_{46}, d_{47}, d_{51}), AND(d_{41}, d_{45}, d_{46}, d_{47}, d_{56}));$$

$$\text{Entre Fases: } EF_6 = OR(AND(d_{62}, d_{63}, d_{89}, d_{90}), AND(d_{62}, d_{63}, d_{116}, d_{117}));$$

$$c_6 = AND(PF_6, EF_6);$$

v) Redundância Analítica Defeito (Grupo 1 - Disjuntor 12L1 – Fase A)

$$\text{Por Fase: } PF_7 = AND(d_1, d_5, d_6, d_7);$$

$$\text{Entre Fases: } EF_7 = AND(d_{64}, d_{66});$$

$$c_7 = AND(PF_7, EF_7);$$

vi) Redundância Analítica Falha (Grupo 1 - Disjuntor 12L1 – Fase A)

$$\text{Por Fase: } PF_8 = OR(AND(d_1, d_5, d_6, d_7, d_{11}), AND(d_1, d_5, d_6, d_7, d_{16}));$$

$$\text{Entre Fases: } EF_8 = OR(AND(d_{64}, d_{66}, d_{91}, d_{92}), AND(d_{64}, d_{66}, d_{118}, d_{120}));$$

$$c_8 = AND(PF_8, EF_8);$$

vii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 1 - Disjuntor 12L1 – Fase B)

Por Fase: $PF_9 = AND(d_{21}, d_{25}, d_{26}, d_{27});$

Entre Fases: $EF_9 = AND(d_{64}, d_{65});$

$c_9 = AND(PF_9, EF_9);$

viii) Redundância Analítica Falha (Grupo 1 - Disjuntor 12L1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{10} = OR(AND(d_{21}, d_{25}, d_{26}, d_{27}, d_{31}), AND(d_{21}, d_{25}, d_{26}, d_{27}, d_{36}));$

Entre Fases: $EF_{10} = OR(AND(d_{64}, d_{65}, d_{91}, d_{92}), AND(d_{64}, d_{65}, d_{118}, d_{119}));$

$c_{10} = AND(PF_{10}, EF_{10});$

ix) Redundância Analítica Defeito (Grupo 1 - Disjuntor 12L1 – Fase C)

Por Fase: $PF_{11} = AND(d_{41}, d_{45}, d_{46}, d_{47});$

Entre Fases: $EF_{11} = AND(d_{65}, d_{66});$

$c_{11} = AND(PF_{11}, EF_{11});$

x) Redundância Analítica Falha (Grupo 1 - Disjuntor 12L1 – Fase C)

Por Fase: $PF_{12} = OR(AND(d_{41}, d_{45}, d_{46}, d_{47}, d_{51}), AND(d_{41}, d_{45}, d_{46}, d_{47}, d_{56}));$

Entre Fases: $EF_{12} = OR(AND(d_{65}, d_{66}, d_{92}, d_{93}), AND(d_{62}, d_{63}, d_{119}, d_{120}));$

$c_{12} = AND(PF_{12}, EF_{12});$

xi) Redundância Analítica Defeito (Grupo 3 – Transformador 02T1 – Enrolamento 1 – Fase A)

Por Fase: $PF_{13} = AND(d_1, d_8, d_9, d_{10});$

Entre Fases: $EF_{13} = AND(d_{67}, d_{69});$

$c_{13} = AND(PF_{13}, EF_{13});$

xii) Redundância Analítica Falha (Grupo 3 – Transformador 02T1 – Enrolamento 1 – Fase A)

Por Fase: $PF_{14} = OR(AND(d_1, d_8, d_9, d_{10}, d_{12}), AND(d_1, d_8, d_9, d_{10}, d_{17}));$

Entre Fases: $EF_{14} = OR(AND(d_{67}, d_{69}, d_{94}, d_{96}), AND(d_{67}, d_{69}, d_{121}, d_{123}));$

$c_{14} = AND(PF_{14}, EF_{14});$

xiii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 3 – Transformador 02T1 – Enrolamento 1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{15} = AND(d_{21}, d_{28}, d_{29}, d_{30});$

Entre Fases: $EF_{15} = AND(d_{67}, d_{68});$

$c_{15} = AND(PF_{15}, EF_{15});$

xiv) Redundância Analítica Falha (Grupo 3 – Transformador 02T1 – Enrolamento 1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{16} = OR(AND(d_{21}, d_{28}, d_{29}, d_{30}, d_{32}), AND(d_{21}, d_{28}, d_{29}, d_{30}, d_{37}));$

Entre Fases: $EF_{16} = OR(AND(d_{67}, d_{68}, d_{94}, d_{95}), AND(d_{67}, d_{68}, d_{121}, d_{122}));$

$$c_{16} = AND(PF_{16}, EF_{16});$$

xv) Redundância Analítica Defeito (Grupo 3 – Transformador 02T1 – Enrolamento 1 – Fase C)

$$\text{Por Fase: } PF_{17} = AND(d_{41}, d_{48}, d_{49}, d_{50});$$

$$\text{Entre Fases: } EF_{17} = AND(d_{68}, d_{69});$$

$$c_{17} = AND(PF_{17}, EF_{17});$$

xvi) Redundância Analítica Falha (Grupo 3 – Transformador 02T1 – Enrolamento 1 – Fase C)

$$\text{Por Fase: } PF_{18} = OR(AND(d_{41}, d_{48}, d_{49}, d_{50}, d_{52}), AND(d_{41}, d_{48}, d_{49}, d_{50}, d_{57}));$$

$$\text{Entre Fases: } EF_{18} = OR(AND(d_{68}, d_{69}, d_{95}, d_{96}), AND(d_{62}, d_{63}, d_{122}, d_{123}));$$

$$c_{18} = AND(PF_{18}, EF_{18});$$

xvii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 4 – Transformador 02T1 – Enrolamento 2 – Fase A)

$$\text{Por Fase: } PF_{19} = AND(d_2, d_4, d_5, d_8);$$

$$\text{Entre Fases: } EF_{19} = AND(d_{70}, d_{72});$$

$$c_{19} = AND(PF_{19}, EF_{19});$$

xviii) Redundância Analítica Falha (Grupo 4 – Transformador 02T1 – Enrolamento 2 – Fase A)

$$\text{Por Fase: } PF_{20} = OR(AND(d_2, d_4, d_5, d_8, d_{13}), AND(d_2, d_4, d_5, d_8, d_{18}));$$

Entre Fases: $EF_{20} = OR(AND(d_{70}, d_{72}, d_{97}, d_{99}), AND(d_{70}, d_{72}, d_{124}, d_{126}));$

$$c_{20} = AND(PF_{20}, EF_{20});$$

xix) Redundância Analítica Defeito (Grupo 4 – Transformador 02T1 – Enrolamento 2 – Fase B)

$$\text{Por Fase: } PF_{21} = AND(d_{22}, d_{24}, d_{25}, d_{28});$$

$$\text{Entre Fases: } EF_{21} = AND(d_{70}, d_{71});$$

$$c_{21} = AND(PF_{21}, EF_{21});$$

xx) Redundância Analítica Falha (Grupo 4 – Transformador 02T1 – Enrolamento 2 – Fase B)

$$\text{Por Fase: } PF_{22} = OR(AND(d_{22}, d_{24}, d_{25}, d_{28}, d_{33}), AND(d_{22}, d_{24}, d_{25}, d_{28}, d_{38}));$$

$$\text{Entre Fases: } EF_{22} = OR(AND(d_{70}, d_{71}, d_{97}, d_{98}), AND(d_{70}, d_{71}, d_{124}, d_{125}));$$

$$c_{22} = AND(PF_{22}, EF_{22});$$

xxi) Redundância Analítica Defeito (Grupo 4 – Transformador 02T1 – Enrolamento 2 – Fase C)

$$\text{Por Fase: } PF_{23} = AND(d_{42}, d_{44}, d_{45}, d_{48});$$

$$\text{Entre Fases: } EF_{23} = AND(d_{71}, d_{72});$$

$$c_{23} = AND(PF_{23}, EF_{23});$$

xxii) Redundância Analítica Falha (Grupo 4 – Transformador 02T1 – Enrolamento 2 – Fase C)

Por Fase: $PF_{24} = OR(AND(d_{42}, d_{44}, d_{45}, d_{48}, d_{53}), AND(d_{42}, d_{44}, d_{45}, d_{48}, d_{58}));$

Entre Fases: $EF_{24} = OR(AND(d_{71}, d_{72}, d_{98}, d_{99}), AND(d_{71}, d_{72}, d_{125}, d_{126}));$

$c_{24} = AND(PF_{24}, EF_{24});$

xxiii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 5 – Disjuntor 11T1 – Fase A)

Por Fase: $PF_{25} = AND(d_2, d_3, d_6, d_9);$

Entre Fases: $EF_{25} = AND(d_{73}, d_{75});$

$c_{25} = AND(PF_{25}, EF_{25});$

xxiv) Redundância Analítica Falha (Grupo 5 – Disjuntor 11T1 – Fase A)

Por Fase: $PF_{26} = OR(AND(d_2, d_3, d_6, d_9, d_{14}), AND(d_2, d_3, d_6, d_9, d_{19}));$

Entre Fases: $EF_{26} = OR(AND(d_{73}, d_{75}, d_{100}, d_{102}), AND(d_{73}, d_{75}, d_{127}, d_{129}));$

$c_{26} = AND(PF_{26}, EF_{26});$

xxv) Redundância Analítica Defeito (Grupo 5 – T Disjuntor 11T1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{27} = AND(d_{22}, d_{23}, d_{26}, d_{29});$

Entre Fases: $EF_{27} = AND(d_{73}, d_{74});$

$c_{27} = AND(PF_{27}, EF_{27});$

xxvi) Redundância Analítica Falha (Grupo 5 - Disjuntor 11T1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{28} = OR(AND(d_{22}, d_{23}, d_{26}, d_{29}, d_{34}), AND(d_{22}, d_{23}, d_{26}, d_{29}, d_{39}));$

Entre Fases: $EF_{28} = OR(AND(d_{73}, d_{74}, d_{100}, d_{101}), AND(d_{73}, d_{74}, d_{127}, d_{128}));$

$c_{28} = AND(PF_{28}, EF_{28});$

xxvii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 5 - Disjuntor 11T1 – Fase C)

Por Fase: $PF_{29} = AND(d_{42}, d_{43}, d_{46}, d_{49});$

Entre Fases: $EF_{29} = AND(d_{74}, d_{75});$

$c_{29} = AND(PF_{29}, EF_{29});$

xxviii) Redundância Analítica Falha (Grupo 5 – Disjuntor 11T1 – Fase C)

Por Fase: $PF_{30} = OR(AND(d_{42}, d_{43}, d_{46}, d_{49}, d_{54}), AND(d_{42}, d_{43}, d_{46}, d_{49}, d_{59}));$

Entre Fases: $EF_{30} = OR(AND(d_{74}, d_{75}, d_{101}, d_{102}), AND(d_{74}, d_{75}, d_{128}, d_{129}));$

$c_{30} = AND(PF_{30}, EF_{30});$

xxix) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – Disjuntor 11C1 – Fase A)

Por Fase: $PF_{31} = AND(d_3, d_4, d_7, d_{10});$

Entre Fases: $EF_{31} = AND(d_{76}, d_{78});$

$c_{31} = AND(PF_{31}, EF_{31});$

xxx) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C1 – Fase A)

Por Fase: $PF_{32} = OR(AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{15}), AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{20}));$

Entre Fases: $EF_{32} = OR(AND(d_{76}, d_{78}, d_{103}, d_{105}), AND(d_{76}, d_{78}, d_{130}, d_{132}));$

$c_{32} = AND(PF_{32}, EF_{32});$

xxxi) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – T Disjuntor 11C1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{33} = AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30});$

Entre Fases: $EF_{33} = AND(d_{76}, d_{77});$

$c_{33} = AND(PF_{33}, EF_{33});$

xxxii) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 - Disjuntor 11C1 – Fase B)

Por Fase: $PF_{34} = OR(AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{35}), AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{40}));$

Entre Fases: $EF_{34} = OR(AND(d_{76}, d_{77}, d_{103}, d_{104}), AND(d_{76}, d_{77}, d_{130}, d_{131}));$

$c_{34} = AND(PF_{34}, EF_{34});$

xxxiii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 - Disjuntor 11C1 – Fase C)

Por Fase: $PF_{35} = AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50});$

Entre Fases: $EF_{35} = AND(d_{77}, d_{78});$

$c_{35} = AND(PF_{35}, EF_{35});$

xxxiv) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C1 – Fase C)

Por Fase: $PF_{36} = OR(AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{55}), AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{60}));$

Entre Fases: $EF_{36} = OR(AND(d_{77}, d_{78}, d_{104}, d_{105}), AND(d_{77}, d_{78}, d_{131}, d_{132}));$

$c_{36} = AND(PF_{36}, EF_{36});$

xxxv) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – Disjuntor 11C2 – Fase A)

Por Fase: $PF_{37} = AND(d_3, d_4, d_7, d_{10});$

Entre Fases: $EF_{37} = AND(d_{79}, d_{81});$

$c_{37} = AND(PF_{37}, EF_{37});$

xxxvi) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C2 – Fase A)

Por Fase: $PF_{38} = OR(AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{15}), AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{20}));$

Entre Fases: $EF_{38} = OR(AND(d_{79}, d_{81}, d_{106}, d_{108}), AND(d_{79}, d_{81}, d_{133}, d_{135}));$

$c_{38} = AND(PF_{38}, EF_{38});$

xxxvii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – T Disjuntor 11C2 – Fase B)

Por Fase: $PF_{39} = AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30});$

Entre Fases: $EF_{39} = AND(d_{79}, d_{80});$

$c_{39} = AND(PF_{39}, EF_{39});$

xxxviii) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 - Disjuntor 11C2 – Fase B)

Por Fase: $PF_{40} = OR(AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{35}), AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{40}));$

Entre Fases: $EF_{40} = OR(AND(d_{79}, d_{80}, d_{106}, d_{107}), AND(d_{79}, d_{80}, d_{133}, d_{134}));$

$c_{40} = AND(PF_{40}, EF_{40});$

xxxix) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 - Disjuntor 11C2 – Fase C)

Por Fase: $PF_{41} = AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50});$

Entre Fases: $EF_{41} = AND(d_{80}, d_{81});$

$c_{41} = AND(PF_{41}, EF_{41});$

xl) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C2 – Fase C)

Por Fase: $PF_{42} = OR(AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{55}), AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{60}));$

Entre Fases: $EF_{42} = OR(AND(d_{80}, d_{81}, d_{107}, d_{108}), AND(d_{80}, d_{81}, d_{134}, d_{135}));$

$c_{42} = AND(PF_{42}, EF_{42});$

xli) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – Disjuntor 11C3 – Fase A)

Por Fase: $PF_{43} = AND(d_3, d_4, d_7, d_{10});$

Entre Fases: $EF_{43} = AND(d_{82}, d_{84});$

$c_{43} = AND(PF_{43}, EF_{43});$

xlii) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C3 – Fase A)

Por Fase: $PF_{44} = OR(AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{15}), AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{20}));$

Entre Fases: $EF_{44} = OR(AND(d_{82}, d_{84}, d_{109}, d_{111}), AND(d_{82}, d_{84}, d_{136}, d_{138}));$

$c_{44} = AND(PF_{44}, EF_{44});$

xliii) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – T Disjuntor 11C3 – Fase B)

Por Fase: $PF_{45} = AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30});$

Entre Fases: $EF_{45} = AND(d_{82}, d_{83});$

$c_{45} = AND(PF_{45}, EF_{45});$

xliv) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 - Disjuntor 11C3 – Fase B)

Por Fase: $PF_{46} = OR(AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{35}), AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{40}));$

Entre Fases: $EF_{46} = OR(AND(d_{82}, d_{83}, d_{109}, d_{110}), AND(d_{82}, d_{83}, d_{136}, d_{137}));$

$c_{46} = AND(PF_{46}, EF_{46});$

xlvi) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 - Disjuntor 11C3 – Fase C)

Por Fase: $PF_{47} = AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50});$

Entre Fases: $EF_{47} = AND(d_{83}, d_{84});$

$c_{47} = AND(PF_{47}, EF_{47});$

xlvi) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C3 – Fase C)

Por Fase: $PF_{48} = OR(AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{55}), AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{60}));$

Entre Fases: $EF_{48} = OR(AND(d_{83}, d_{84}, d_{110}, d_{111}), AND(d_{83}, d_{84}, d_{137}, d_{138}));$

$c_{48} = AND(PF_{48}, EF_{48});$

xlvi) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – Disjuntor 11C4 – Fase A)

Por Fase: $PF_{49} = AND(d_3, d_4, d_7, d_{10});$

Entre Fases: $EF_{49} = AND(d_{85}, d_{87});$

$c_{49} = AND(PF_{49}, EF_{49});$

xlvi) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C4 – Fase A)

Por Fase: $PF_{50} = OR(AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{15}), AND(d_3, d_4, d_7, d_{10}, d_{20}));$

Entre Fases: $EF_{50} = OR(AND(d_{85}, d_{87}, d_{112}, d_{114}), AND(d_{85}, d_{87}, d_{139}, d_{141}));$

$c_{50} = AND(PF_{50}, EF_{50});$

xli) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 – T Disjuntor 11C4 – Fase B)

Por Fase: $PF_{51} = AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30});$

Entre Fases: $EF_{51} = AND(d_{85}, d_{86});$

$c_{51} = AND(PF_{51}, EF_{51});$

l) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 - Disjuntor 11C4 – Fase B)

Por Fase: $PF_{52} = OR(AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{35}), AND(d_{23}, d_{24}, d_{27}, d_{30}, d_{40}));$

Entre Fases: $EF_{52} = OR(AND(d_{85}, d_{86}, d_{112}, d_{113}), AND(d_{85}, d_{86}, d_{139}, d_{140}));$

$c_{52} = AND(PF_{52}, EF_{52});$

li) Redundância Analítica Defeito (Grupo 6 - Disjuntor 11C4 – Fase C)

Por Fase: $PF_{53} = AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50});$

Entre Fases: $EF_{53} = AND(d_{86}, d_{87});$

$c_{53} = AND(PF_{53}, EF_{53});$

lii) Redundância Analítica Falha (Grupo 6 – Disjuntor 11C4 – Fase C)

Por Fase: $PF_{54} = OR(AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{55}), AND(d_{43}, d_{44}, d_{47}, d_{50}, d_{60}));$

Entre Fases: $EF_{54} = OR(AND(d_{86}, d_{87}, d_{113}, d_{114}), AND(d_{86}, d_{87}, d_{140}, d_{141}));$

$c_{54} = AND(PF_{54}, EF_{54});$

Modelos Qualitativos

Este anexo especifica todos os elementos de transformação do espaço de recurso para o espaço de decisão.

- Elementos do Espaço de Decisão:

i) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 12L1)

$d_5 = OR(PT12L1A, PT12L1B, PT12L1C)$

ii) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 12L1)

$$d_6 = OR(PI12L1A, PI12L1B, PI12L1C)$$

iii) Decisão Defeito (Disjuntor 12L1)

$$d_7 = OR(c_7, c_9, c_{11})$$

iv) Decisão Falha (Disjuntor 12L1)

$$d_8 = OR(c_8, c_{10}, c_{12})$$

v) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_9 = OR(PT02T1A1, PT02T1B1, PT02T1C1)$$

vi) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_{10} = OR(PI02T1A1, PI02T1B1, PI02T1C1)$$

vii) Decisão Defeito (Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_{11} = OR(c_{13}, c_{15}, c_{17})$$

viii) Decisão Falha (Transformador 02T1 - Enrolamento 1)

$$d_{12} = OR(c_{14}, c_{16}, c_{18})$$

ix) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{13} = OR(PT02T1A2, PT02T1B2, PT02T1C2)$$

x) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{14} = OR(PI02T1A2, PI02T1B2, PI02T1C2)$$

xi) Decisão Defeito (Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{15} = OR(c_{19}, c_{21}, c_{23})$$

xii) Decisão Falha (Transformador 02T1 - Enrolamento 2)

$$d_{16} = OR(c_{20}, c_{22}, c_{24})$$

xiii) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 11T1)

$$d_{17} = OR(PT11T1A, PT11T1B, PT11T1C)$$

xiv) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 11T1)

$$d_{18} = OR(PI11T1A, PI11T1B, PI11T1C)$$

xv) Decisão Defeito (Disjuntor 11T1)

$$d_{19} = OR(c_{25}, c_{27}, c_{29})$$

xvi) Decisão Falha (Disjuntor 11T1)

$$d_{20} = OR(c_{26}, c_{28}, c_{30})$$

xvii) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 11C1)

$$d_{21} = OR(PT11C1A, PT11C1B, PT11C1C)$$

xviii) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 11C1)

$$d_{22} = OR(PI11C1A, PI11C1B, PI11C1C)$$

xix) Decisão Defeito (Disjuntor 11C1)

$$d_{23} = OR(c_{31}, c_{33}, c_{35})$$

xx) Decisão Falha (Disjuntor 11C1)

$$d_{24} = OR(c_{32}, c_{34}, c_{36})$$

xxi) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 11C2)

$$d_{25} = OR(PT11C2A, PT11C2B, PT11C2C)$$

xxii) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 11C2)

$$d_{26} = OR(PI11C2A, PI11C2B, PI11C2C)$$

xxiii) Decisão Defeito (Disjuntor 11C2)

$$d_{27} = OR(c_{37}, c_{39}, c_{41})$$

xxiv) Decisão Falha (Disjuntor 11C2)

$$d_{28} = OR(c_{38}, c_{40}, c_{42})$$

xxv) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 11C3)

$$d_{29} = OR(PT11C3A, PT11C3B, PT11C3C)$$

xxvi) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 11C3)

$$d_{30} = OR(PI11C3A, PI11C3B, PI11C3C)$$

xxvii) Decisão Defeito (Disjuntor 11C3)

$$d_{31} = OR(c_{43}, c_{45}, c_{47})$$

xxviii) Decisão Falha (Disjuntor 11C3)

$$d_{32} = OR(c_{44}, c_{46}, c_{48})$$

xxix) Decisão Sobrecorrente Temporizado (Disjuntor 11C4)

$$d_{33} = OR(PT11C4A, PT11C4B, PT11C4C)$$

xxx) Decisão Sobrecorrente Instantâneo (Disjuntor 11C4)

$$d_{34} = OR(PI11C4A, PI11C4B, PI11C4C)$$

xxxi) Decisão Defeito (Disjuntor 11C4)

$$d_{35} = OR(c_{49}, c_{51}, c_{53})$$

xxxii) Decisão Falha (Disjuntor 11C4)

$$d_{36} = OR(c_{50}, c_{52}, c_{54})$$