



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

DANIEL CAMPOS NEGREIROS

**Um Sistema Especialista de Suporte a Decisão para Desligamentos em
Subestações de Energia**

FORTALEZA

2010

DANIEL CAMPOS NEGREIROS

Um Sistema Especialista de Suporte a Decisão para Desligamentos em
Subestações de Energia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da UFC como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Teleinformática. Área de Concentração: Automação de Subestações de Potência

Orientador: Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho

FORTALEZA

2010

2

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N312s Negreiros, Daniel Campos.
Um Sistema Especialista de Suporte a Decisão para Desligamentos em Subestações de Energia / Daniel Campos Negreiros. – 2010.
93 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2010.
Orientação: Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho.

1. Inteligência Artificial. 2. Automação. 3. Proteção. I. Título.

CDD 621.38

DANIEL CAMPOS NEGREIROS

Um Sistema Especialista de Suporte a Decisão para Desligamentos em
Subestações de Energia

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Teleinformática da UFC como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Teleinformática.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Tarcísio Costa Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Gilmar Barreto
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

A minha esposa Michelle, e filhos Danielle e Michel

Aos meus pais: Franzé e Edna

Aos meus irmãos: Carol, David e Liana

Ao meu orientador Tarcísio Costa

Ao meu companheiro Diogo Nina

Aos amigos André Araújo e Edilson Rocha

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente na confecção desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. José Tarcísio Costa Filho, pelas oportunidades oferecidas, incentivo constante e orientação segura.

À instituição UFC, por sempre me acolher de forma humana, e sempre fazer parte da minha vida acadêmica.

Ao Professor André Luís Carneiro de Araújo por ter me incentivado e ajudar a dar este importante passo.

Ao Engenheiro Diogo Luís Figueiredo Nina, pelo auxílio na confecção do sistema especialista. Sem você, seria muito mais difícil!

Aos amigos, que estiveram nas mesmas lutas na obtenção do grau de mestre, e de alguma forma contribuíram para o êxito deste trabalho em especial: Ananda, Tiago, Elvis, Darlan, Amauri, dentre outros.

À minha família pelo apoio e incentivo.

“As Organizações precisam melhorar continuamente os seus processos, produtos e serviços. Também é importante investir em inovação para superar a concorrência e obter sucesso em seu nicho de atuação. As empresas que não se adaptarem a essa realidade estão fadadas ao fracasso” (SANTOS; SILVA; P.38).

RESUMO

Diante das metas regulatórias de continuidade do fornecimento de energia elétrica atribuídas pela ANEEL às distribuidoras de energia elétrica, o cumprimento delas depende principalmente da minimização do tempo de retorno do sistema pós-falha, bem como do número de falhas provocadas por erro humano. Em vista de uma evidente carência de pessoas qualificadas no setor elétrico, sistemas inteligentes, tais como sistemas especialistas, que venham a auxiliar a operação e supervisão de sistemas elétricos, possuem um futuro promissor.

Neste trabalho, propõe-se o projeto de um sistema especialista, cuja base de conhecimento é estruturada a partir da modelagem dos modos de falhas do sistema elétrico em estudo, formatados através da técnica de árvore de falhas. A arquitetura proposta para este sistema especialista é constituída dos seguintes módulos: unidade central, denominada Módulo Principal, *Interface* com o Usuário, Gerenciador de Eventos, e Gerenciador Estatístico; o sistema desenvolvido funciona baseado na leitura *on-line* do *Tags* dos relés do sistema de proteção da subestação em estudo, comparando com a árvore de falhas específica daquela subestação, fornecendo a causa-raiz da falha ocorrida de forma determinística ou estatística ao Operador do Sistema. Tal informação é crucial para o especialista humano tomar a decisão mais acertada e restabelecer o sistema elétrico no menor tempo possível.

Palavras-chave: Automação; Inteligência Artificial; Sistema Especialista.

ABSTRACT

Faced with regulatory goals of quality continuity of electric power supply granted by ANEEL to electricity distributors, their fulfillment depends mainly on minimizing both time to return the system failover, and the number of failures caused by human error. In view of the apparent lack of qualified people in the electricity sector, intelligent systems, such as expert systems, which will assist the operation and supervision of electrical systems, have a promising future.

This work proposes the project and the implementation of an expert system, where the *knowledge base* is structured from the modeling of the studied electrical system failure modes, formatted through failure tree analysis technique. The proposed architecture for this expert system is composed from the following modules: central unit, referred as *Main Module*, *User's Interface*, *Events Manager* and *Statistic Manager*; Work-based online reading *Tags* of the relays in the protection system of the substation under study, compared to the fault tree specific to that substation, providing the root cause of failure occurred in a deterministic or statistical to operator of the system. Such information is crucial for the human expert to take the right decision and restore the electrical system in the shortest time possible.

Keywords: Automation; Artificial Intelligence; Expert System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Distribuição do Consumo de Energia Elétrica no Brasil em 2007	15
Figura 1.2 - Redução de FEC da CEMAR (2004 – 2009).....	16
Figura 1.3 - Redução de DEC da CEMAR (2004 – 2009).....	17
Figura 1.4 - Arquitetura Básica de um Sistema Especialista	18
Figura 2.1 - Exemplo de diagrama de seletividade de um sistema elétrico.....	21
Figura 2.2 - Exemplo de codificação ANSI.....	26
Figura 2.3 - Árvore hierarquizada das causas genéricas de falhas.	28
Figura 2.4 - Árvore de falhas típica	35
Figura 2.5 - A probabilidade do evento topo é o produto das probabilidades.....	36
Figura 2.6 - A probabilidade do evento topo é a soma das probabilidades individuais subtraída da probabilidade da interseção	37
Figura 2.7 - Exemplo de representação por FTA.....	38
Figura 3.1 - Histórico das pesquisas em IA	41
Figura 3.2 - Características dos especialistas humanos versus os artificiais	42
Figura 3.3 - Encadeamento misto, quando uma busca passa pela outra.....	49
Figura 3.4 - Arquitetura básica de um sistema especialista	50
Figura 3.5 - Fluxograma Mecanismo de Inferência.....	502
Figura 3.6 - Ranking das Linguagens de Programação mais usadas (DEZ/09)	55
Figura 3.7 - Montagem de Regras usando o Expert SINTA.....	55
Figura 3.8 - Árvore de Classes e Objetos no ORGANIZER	58
Figura 4.1 - Arquitetura do sistema especialista proposto.....	61
Figura 4.2 - Algoritmo da Máquina de Inferência do Módulo Principal	64
Figura 4.3 - Palácio dos Leões.....	66
Figura 4.4 - Dimensões do Maranhão.....	67

Figura 4.5 - Sistema supervisorio	69
Figura 4.6 - Ligação do sistema supervisorio da aplicação	70
Figura 4.7 - Primeiro ramo da árvore de falhas	72
Figura 4.8 - Ramos da Árvore de Falhas	73
Figura 5.1 - Visualização da tela principal do SE.....	75
Figura 5.2 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 1ª simulação	77
Figura 5.3 - Visualização da falha no SE.....	77
Figura 5.4 - Visualização do Diagnóstico do SE.....	78
Figura 5.5 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 2ª simulação	79
Figura 5.6 - Visualização da falha no SE.....	79
Figura 5.7 - Visualização do Diagnóstico do SE.....	80
Figura 5.8 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 3ª simulação	81
Figura 5.9 - Visualização da falha no SE.....	81
Figura 5.10 - Visualização do Diagnóstico do SE.....	82
Figura 5.11 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 4ª simulação	83
Figura 5.12 - Visualização da falha no SE.....	83
Figura 5.13 - Visualização do Diagnóstico do SE.....	84
Figura 5.14 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 5ª simulação	85
Figura 5.15 - Visualização da falha no SE.....	85
Figura 5.16 - Visualização do Diagnóstico do SE.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	Asea Brown Boverly
ANSI	American National Standard Institute
BF	Break Failure
CLP	Controlador Lógico Programável
EUREDATA	European Reliability Data Bank Association
FTA	Fault Tree Analysis - Árvore de Falhas
IA	Inteligência Artificial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KEE	Knowledge Engineering Environment
LISP	LISts Processing
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
MTTR	Means Time To Repair - Tempo Médio de Reparo
NPPC	Nuclear Power Plant Consultant
OREDA	Offshore Reliability Data Bank
PCC	Programa Computacional Convencional
PROLOG	PROgramming in LOGic
RC	Representação do Conhecimento
RP	Regras de Produção
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition - Controle Supervisório e Aquisição de Dados
T	Transformador Abaixador
TR	Transformador Regulador
TRAFO	Transformador
SE	Sistema Especialista
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente por Consumidor
FEC	Frequência Equivalente por Consumidor
DIC	Duração Individual do Consumidor
FIC	Frequência Individual Consumidor
DMIC	Duração Máxima Individual do Consumidor
PRODIST	Procedimento de Distribuição do Sistema Elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Taxa de falha
•	Símbolo da operação booleana E
+	Símbolo da operação booleana OU

SUMÁRIO

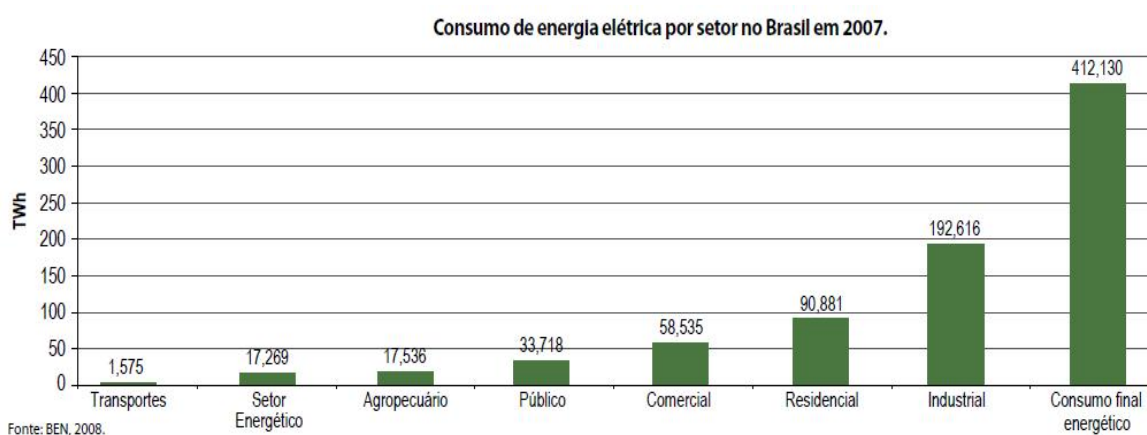
1	INTRODUÇÃO	15
2	ANÁLISE DE FALHAS DE UM SISTEMA ELÉTRICO GENÉRICO	20
2.1	Introdução.....	20
2.2	Análise de falhas de um sistema elétrico genérico.....	20
2.3	Formatação de regras	27
2.4	Falhas elétricas e seus modos	30
2.5	Árvore de falhas	33
2.6	Considerações finais.....	38
3	SISTEMAS ESPECIALISTAS - PRINCÍPIOS GERAIS.....	39
3.1	Introdução.....	39
3.2	Inteligência artificial	39
3.3	Conceituação de Sistemas Especialistas	40
3.4	Classificação dos Sistemas Especialistas	43
3.4.1	<i>Forma de representação do conhecimento.....</i>	<i>43</i>
3.4.2	<i>Regras de Produção dos Sistemas Especialistas</i>	<i>45</i>
3.4.3	<i>Estratégia de controle do Sistema Especialista</i>	<i>47</i>
3.4.4	<i>Modos de operação</i>	<i>49</i>
3.5	Arquitetura básica de Sistemas Especialistas e forma de operação	50
3.6	Ferramentas de Programação para o Desenvolvimento de Sistemas Especialistas	53
3.7	Sistemas Especialistas em Sistemas de Energia Elétrica	56
3.8	Escolha do ELPISE SOFTWARE	57
3.9	Considerações finais.....	58
4	SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE CAUSAS DE DESLIGAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE ENERGIA	60

4.1	Introdução.....	60
4.2	Descrição do Sistema Especialista	60
4.3	Aplicação do Sistema Especialista	66
4.4	Considerações finais.....	73
5	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA ESPECIALISTA ATRAVÉS DE TESTES E SIMULAÇÕES.....	74
5.1	Introdução.....	74
5.2	Operação do Sistema Especialista	74
5.3	Características dos Testes e Simulações.....	75
5.4	Estudo de Casos.....	76
5.5	Considerações finais.....	86
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
	APÊNDICE A	89
	APÊNDICE B	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Certamente, a distribuição de energia elétrica é um dos serviços mais importantes para o Brasil, pois a energia é a base para o desenvolvimento como pode ser vista na Fig. 1.1. Esta enorme importância exige muita responsabilidade e monitoramento constante de todos os tipos de detalhes, para que a qualidade do serviço não seja afetada.

Figura 1.1 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica no Brasil em 2007



O desafio permanente para manter um sistema elétrico confiável e com alta disponibilidade implica na relação de compromisso entre o número mínimo de falhas elétricas e sua capacidade de identificá-las e isolá-las o mais rápido possível, de forma confiável. No entanto, devido ao fator humano na identificação, e correção destas falhas, quanto mais freqüentes forem as falhas em um sistema, mais rápido e confiável serão a identificação e isolamento do subsistema e/ou ramal causador da falha, devido à maior fluência das equipes de operação e manutenção com as técnicas de identificação e correção das causas da falha elétrica do referido sistema. Outro fator humano crítico na identificação da causa-raiz da falha elétrica é a componente emocional da equipe de operação no momento da falha, cujo estado emocional depende de diversos fatores externos, muitas vezes intangíveis.

Além do que foi dito, outro ponto que tem sido foco para muitas empresas distribuidoras de energia elétrica é o valor da multa por violação dos indicadores de continuidade característicos do setor elétrico como: DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC. Com o lançamento do PRODIST, a ANEEL criou novas metas muito mais desafiadoras para os indicadores de continuidade, e reajustou significativamente o valor das multas por violação,

fazendo com que a redução do número de falhas e do tempo de reposição delas, tonarem-se uma verdadeira obsessão para as empresas do setor elétrico brasileiro. Ver Fig. 1.2 e Fig. 1.3.

Figura 1.2 – Redução de FEC da CEMAR (2004 – 2009)

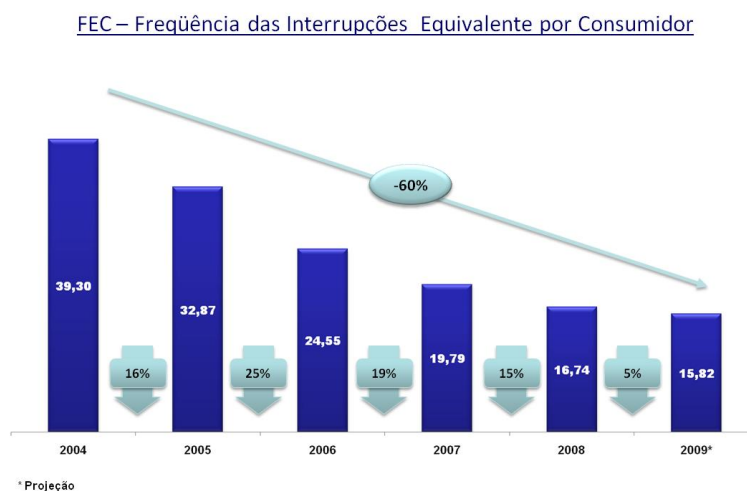
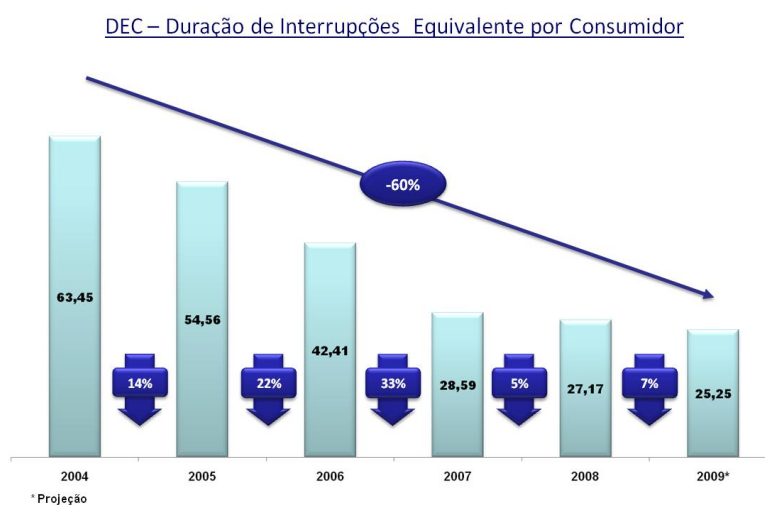


Figura 1.3 – Redução de DEC da CEMAR (2004 – 2009)



A metodologia de identificação e correção das causas de uma falha elétrica baseia-se no conhecimento da forma operativa do sistema elétrico, das características dos equipamentos e dos diversos desenhos relativos a este sistema, tais como: desenhos funcionais, diagramas unifilares, trifilares e de bloco. A profundidade deste conhecimento é diretamente proporcional à experiência do profissional envolvido, e da sua capacidade de análise de alarmes e/ou sinalizações. Após a identificação de uma falha elétrica, a sua correção é feita a partir da causa desta falha, supostamente detectada. *Uma análise cujo resultado não seja a causa-raiz quase sempre leva o sistema a falhar novamente.*

Normalmente, sistemas elétricos são projetados com retaguarda, possibilitando que os diversos subsistemas sejam alimentados por mais de um ramal. Estas redundâncias permitem que subsistemas ou ramais sejam isolados, sem necessitar interromper o fornecimento de energia elétrica às cargas, em casos de manutenções, ou com impactos reduzidos, nos casos de isolamentos por falhas, otimizando a operação global do sistema. É usual a existência de procedimentos escritos de isolamento dos diversos subsistemas.

Um sistema elétrico eficiente possui uma equipe de manutenção que viabiliza um número mínimo de falhas elétricas em equipamentos, e uma equipe de operação que, além de provocar o menor número possível de falhas operacionais (*trips*), identifica e isola falhas elétricas de forma confiável - encontrando sempre a causa-raiz, e o mais rápido possível, maximizando assim a operação global do sistema.

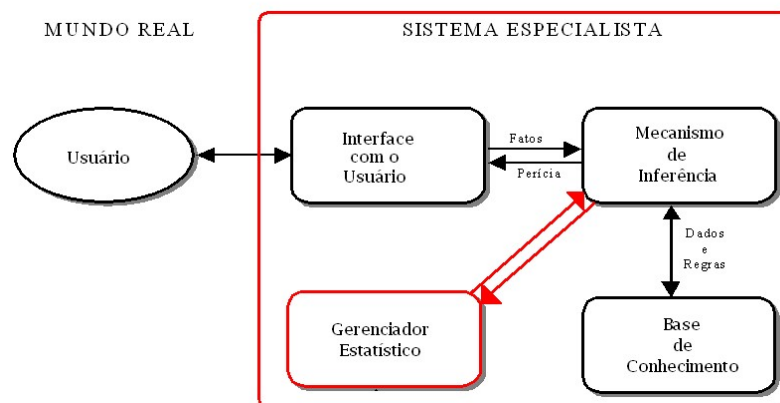
O desenvolvimento da tecnologia dos Sistemas Especialistas, área da Inteligência Artificial que codifica e utiliza o conhecimento especializado para resolução de problemas em nível de especialista humano, pode ser usado como suporte para o desafio citado. Combinando-se as características dos sistemas computacionais, tais como: velocidade de processamento, disponibilidade de trabalho, e uniformidade e precisão de análise nas tarefas repetitivas, com as qualidades dos especialistas humanos, principalmente criatividade, senso crítico e capacidade de adaptação, é possível obter um sistema especialista de alto desempenho para o diagnóstico de falhas elétricas. Este sistema especialista (SE) funcionaria como um suporte para a tomada de decisão junto ao operador do sistema elétrico para identificação das causas-raízes das falhas elétricas.

Neste trabalho, propõe-se o projeto de um sistema especialista, cuja base de conhecimento é estruturada a partir da modelagem dos modos de falhas do sistema elétrico em estudo, formatados através da técnica de árvore de falhas. Por esta técnica, estabelece-se um evento indesejado inicial, denominado evento topo, e desenvolve-se então uma lógica booleana para identificar as causas deste evento, possibilitando o controle posterior destas causas, tanto no aspecto qualitativo quanto quantitativo. Neste contexto, a árvore de falhas será essencial para a formatação das regras de produção do sistema especialista.

A arquitetura proposta para este sistema especialista é constituída dos seguintes módulos: unidade central, denominada Módulo Principal, *Interface* com o Usuário, Gerenciador de Eventos, e Gerenciador Estatístico. Esta estrutura modular visa possibilitar a *interface* do sistema especialista com os vários dispositivos de registro de eventos disponíveis comercialmente que possuem padrões específicos para cada fabricante, bem como facilitar futuras expansões e manutenções nas diversas partes do sistema.

O sistema especialista funciona da seguinte maneira: o Gerenciador de Eventos supervisiona continuamente cada evento recebido. Ao detectar um evento preestabelecido (isto é, que consta em sua lista como evento para disparar o módulo principal do SE), gera uma lista ordenada de eventos relacionados com a ocorrência. Esta lista ativa o Módulo Principal, que, utilizando-se de sua máquina de inferência, confronta esta lista de eventos com seu conjunto de regras, determinando assim a causa-raiz da ocorrência. O conhecimento utilizado neste sistema é representado através de Regra de Produção, sendo codificado no formato SE - ENTÃO, e sua estrutura baseia-se na ordenação de eventos na hierarquia de árvore de falhas. O algoritmo da máquina de inferência utiliza a estratégia de controle de encadeamento para trás.

Figura 1.4 – Arquitetura Básica de um Sistema Especialista



O módulo de Gerenciador Estatístico atualiza, a partir dos eventos registrados pelo Gerenciador de Eventos, a taxa de falha dos eventos básicos (causas-raízes potenciais), mantendo um banco de dados de taxas de falhas de eventos básicos sempre atualizados. Este processo de atualização permite que o Módulo Principal realize análises estatísticas de confiabilidade em qualquer ramo da árvore de falhas, bem como prognóstico de causas de desligamentos, quando da falha na obtenção do diagnóstico por problemas de registros de eventos. Tais problemas podem ocorrer, por exemplo, por insuficiência de número de pontos de registro, inconsistências de lógica, ou não registro deste evento pelo sistema de aquisição de dados.

O sistema especialista proposto responde a eventos preestabelecidos, supervisionados pelo Gerenciador de Eventos, podendo este evento ser o evento-topo da árvore de falhas, ou outro evento de interesse, podendo ser também mais de um evento.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA

- 1) Aprovado: *UM SISTEMA ESPECIALISTA DE SUPORTE A DECISÃO PARA DESLIGAMENTOS EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA*, XIX SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo, 2010.

- 2) Submetido: *UM SISTEMA ESPECIALISTA DE SUPORTE A DECISÃO PARA DESLIGAMENTOS EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA*, XIII Encontro Nacional de Instalações Elétricas – ENIE, São Paulo, 2010

2 ANÁLISE DE FALHAS DE UM SISTEMA ELÉTRICO GENÉRICO

2.1 Introdução

Indisponibilidades operacionais e manutenções corretivas são fatores preocupantes nas empresas, visto que geram elevados custos financeiros, além de imprevistos quanto ao cumprimento de planos de produção, justificando o estabelecimento de políticas de confiabilidade. Neste contexto, a análise de falhas mostra-se como uma importante ferramenta de suporte a estas políticas.

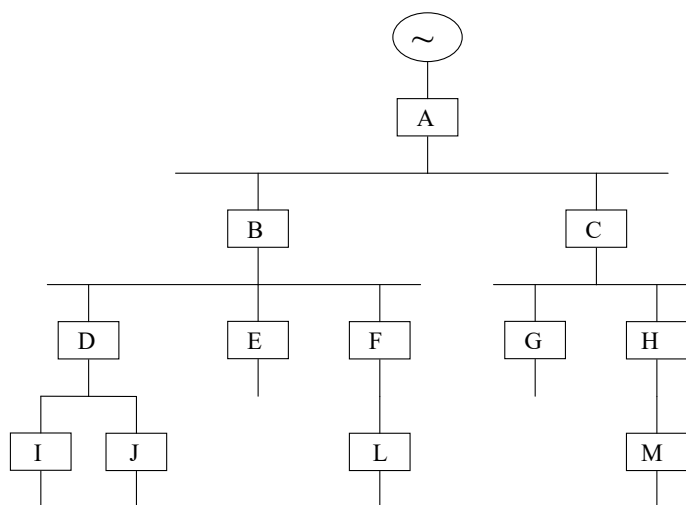
Neste capítulo, se fará a análise de falhas de um dado sistema elétrico genérico, a partir de uma lista de proteções encontrada em um diagrama de seletividade, diagrama este muito comum em sistemas elétricos. Definir-se-á seletividade e proteções de retaguarda, e se formulará um conjunto de proposições modelando a lógica de proteção do sistema elétrico genérico, para a formatação destas proposições como regras. Esta modelagem da lógica de proteção será feita a partir de uma árvore de falhas, que é um processo dedutivo que, partindo-se de um evento indesejado pré-definido, buscam-se as possíveis causas de tal evento. A conceituação de árvore de falhas será brevemente discutida na seção 2.5. Estas regras serão usadas num sistema computacional inteligente para o diagnóstico de causas de desligamentos de um sistema elétrico de potência genérico, que é a aplicação proposta neste trabalho.

2.2 Análise de falhas de um sistema elétrico genérico

Apesar dos sistemas elétricos serem formados por equipamentos de alta qualidade e robustez, devido à alta complexidade destes sistemas e a fatores internos e externos, eles não são imunes a perturbações e defeitos. Por esta razão, os sistemas elétricos são normalmente protegidos por um esquema de proteção que visa, no caso da ocorrência de uma falha, limitar os danos causados aos seus componentes, e reduzir ao mínimo as interrupções no fornecimento de energia. Para tal, uma correta seleção, coordenação, ajuste e aplicação dos diversos equipamentos e dispositivos protetores deste sistema fazem-se necessários.

Quando corretamente projetado, o esquema de proteção possui uma característica denominada seletividade, que visa, em caso de falha, desligar o menor número de equipamentos suficientes para isolar apenas a parte afetada, mantendo o resto do sistema elétrico em operação.

Figura 2.1 - Exemplo de diagrama de seletividade de um sistema elétrico



Um exemplo de seletividade pode ser visto na Fig. 2.1. Considere os quadrados identificados por letras como elementos de seccionamento do sistema, tais como disjuntores, chaves seccionadoras e fusíveis, operados por proteção, isto é, abertos quando da operação de uma proteção, e as linhas que conectam os quadrados, como linhas de transmissão de carga, tais como cabos elétricos e barramentos. Neste contexto, pode-se entender o diagrama de seletividade através dos seguintes exemplos: se houver uma falha entre J e D, a proteção deverá operar no elemento D, desligando todas as cargas alimentadas por I e J, mas mantendo todo o restante do sistema em operação. Da mesma forma, se tivermos uma falha na carga alimentada por M, a proteção deverá operar apenas neste elemento, mantendo todo o restante do sistema em operação.

Pode-se observar claramente no diagrama da Fig. 2.1, a existência de uma hierarquia de proteção. Equacionando-se este diagrama de seletividade, obtém-se:

$$O_I = F_I \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } I, \text{ houve falha no circuito alimentado por } I) \quad (2-1.a)$$

$$O_J = F_J \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } J, \text{ houve falha no circuito alimentado por } J) \quad (2-1.b)$$

$$O_L = F_L \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } L, \text{ houve falha no circuito alimentado por } L) \quad (2-1.c)$$

$$O_M = F_M \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } M, \text{ houve falha no circuito alimentado por } M) \quad (2-1.d)$$

$$O_D = F_{ID} \cup F_{JD} \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } D, \text{ houve falha no} \quad (2-1.e) \\ \text{circuito alimentado por } D, \text{ ou seja, no ramal } I-D \text{ ou no} \\ \text{ramal } J-D)$$

$$O_E = F_E \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } E, \text{ houve falha no circuito} \quad (2-1.f) \\ \text{alimentado por } E)$$

$$O_F = F_{LF} \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } F, \text{ houve falha no circuito} \quad (2-1.g) \\ \text{alimentado por } F, \text{ ou seja, no ramal } L-F)$$

$$O_G = F_G \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } G, \text{ houve falha no circuito} \quad (2-1.h) \\ \text{alimentado por } G)$$

$$O_H = F_{MH} \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } H, \text{ houve falha no circuito} \quad (2-1.i) \\ \text{alimentado por } H, \text{ ou seja, no ramal } M-H)$$

$$O_B = F_{DB} \cup F_{EB} \cup F_{FB} \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } B, \text{ houve falha} \quad (2-1.j) \\ \text{no circuito alimentado por } B, \text{ ou seja, no ramal} \\ D-B, E-B \text{ ou } F-B)$$

$$O_C = F_{GC} \cup F_{HC} \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } C, \text{ houve falha no} \quad (2-1.k) \\ \text{circuito alimentado por } C, \text{ ou seja, no ramal } G-C \text{ ou } H- \\ C)$$

$$O_A = F_{BA} \cup F_{CA} \quad (\text{lê-se: se a proteção operou em } A, \text{ houve falha no} \quad (2-1.l) \\ \text{circuito alimentado por } A, \text{ ou seja, no ramal } B-A \text{ ou no} \\ \text{ramal } C-A)$$

Seja P_{xy} a proteção que quando atuada, opera o elemento de seccionamento x , isolando todas as cargas alimentadas por este elemento, onde y é um número inteiro que para cada diferente elemento x , identifica um diferente tipo de proteção.

Nas equações (2-1), F_k representa, para cada elemento de seccionamento x ou ramal R_1-R_2 , as alternativas de falhas que levariam à operação por proteção O_x em x . Como apenas as falhas protegidas por P_{xy} levam a O_x , pode-se substituir F_k por seu P_{xy} correspondente, ou seja:

$$O_I = P_{I1} \cup P_{I2} \cup \dots \cup P_{In} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } I \text{ devido a} \quad (2-2.a) \\ \text{atuação da proteção } P_{I1}, \text{ ou } P_{I2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{In})$$

$$O_J = P_{J1} \cup P_{J2} \cup \dots \cup P_{Jn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } J \text{ devido a} \quad (2-2.b) \\ \text{atuação da proteção } P_{J1}, \text{ ou } P_{J2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Jn})$$

$$O_L = P_{L1} \cup P_{L2} \cup \dots \cup P_{Ln} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } L \text{ devido a} \quad (2-2.c) \\ \text{atuação da proteção } P_{L1}, \text{ ou } P_{L2}, \text{ ou } \dots \text{ ou}$$

$$P_{Ln})$$

$$O_M = P_{M1} \cup P_{M2} \cup \dots \cup P_{Mn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } M \text{ devido à atuação da proteção } P_{M1}, \text{ ou } P_{M2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Mn}) \quad (2-2.d)$$

$$O_D = P_{D1} \cup P_{D2} \cup \dots \cup P_{Dn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } D \text{ devido à atuação da proteção } P_{D1}, \text{ ou } P_{D2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Dn},) \quad (2-2.e)$$

$$O_E = P_{E1} \cup P_{E2} \cup \dots \cup P_{En} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } E \text{ devido à atuação da proteção } P_{E1}, \text{ ou } P_{E2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{En}) \quad (2-2.f)$$

$$O_F = P_{F1} \cup P_{F2} \cup \dots \cup P_{Fn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } F \text{ devido à atuação da proteção } P_{F1}, \text{ ou } P_{F2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Fn}) \quad (2-2.g)$$

$$O_G = P_{G1} \cup P_{G2} \cup \dots \cup P_{Gn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } G \text{ devido à atuação da proteção } P_{G1}, \text{ ou } P_{G2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Gn}) \quad (2-2.h)$$

$$O_H = P_{H1} \cup P_{H2} \cup \dots \cup P_{Hn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } H \text{ devido à atuação da proteção } P_{H1}, \text{ ou } P_{H2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Hn}) \quad (2-2.i)$$

$$O_B = P_{B1} \cup P_{B2} \cup \dots \cup P_{Bn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } B \text{ devido à atuação da proteção } P_{B1}, \text{ ou } P_{B2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Bn}) \quad (2-2.j)$$

$$O_C = P_{C1} \cup P_{C2} \cup \dots \cup P_{Cn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } C \text{ devido à atuação da proteção } P_{C1}, \text{ ou } P_{C2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Cn}) \quad (2-2.k)$$

$$O_A = P_{A1} \cup P_{A2} \cup \dots \cup P_{An} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } A \text{ devido à atuação da proteção } P_{A1}, \text{ ou } P_{A2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{An}) \quad (2-2.l)$$

É importante introduzir o conceito de proteção de retaguarda, também conhecida como BF (*Break Failure*) [11], existente em quase todos os sistemas elétricos. A proteção BF opera no elemento de seccionamento do alimentador do elemento que deveria ter operado inicialmente, isolando a falha. Esta proteção, normalmente, é acionada simultaneamente com

a principal, mas, devido a sua temporização, somente atua no caso em que não haja abertura do circuito de seccionamento da proteção principal.

Exemplificando-se o funcionamento da proteção BF, a partir da Fig. 2.1, pode-se observar que quando uma proteção aciona a abertura do elemento de seccionamento I , uma supervisão temporizada de abertura deste elemento é acionada. Expirado o tempo predeterminado, caso o elemento I continue fechado, ou a falha detectada pela proteção permaneça, a proteção BF aciona simultaneamente a abertura do elemento D , e a supervisão temporizada deste elemento. Expirado o tempo predeterminado, caso o elemento D continue fechado, ou a falha detectada pela proteção permaneça, a proteção BF aciona a abertura do elemento B , e assim sucessivamente. Neste exemplo, observa-se que quando uma proteção BF atua, desliga, além da carga defeituosa, outras cargas, exigindo, por este motivo, uma correta seleção, coordenação, ajuste e aplicação dos diversos equipamentos e dispositivos protetores, conforme já observado anteriormente.

Inserindo-se as proteções BFs de cada elemento de seccionamento nas equações 2-2, tem-se:

$$O_I = P_{I1} \cup P_{I2} \cup \dots \cup P_{In} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } I \text{ devido a atuação da proteção } P_{I1}, \text{ ou } P_{I2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{In}) \quad (2-3.a)$$

$$O_J = P_{J1} \cup P_{J2} \cup \dots \cup P_{Jn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } J \text{ devido a atuação da proteção } P_{J1}, \text{ ou } P_{J2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Jn}) \quad (2-3.b)$$

$$O_L = P_{L1} \cup P_{L2} \cup \dots \cup P_{Ln} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } L \text{ devido a atuação da proteção } P_{L1}, \text{ ou } P_{L2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Ln}) \quad (2-3.c)$$

$$O_M = P_{M1} \cup P_{M2} \cup \dots \cup P_{Mn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } M \text{ devido a atuação da proteção } P_{M1}, \text{ ou } P_{M2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Mn}) \quad (2-3.d)$$

$$O_D = P_{D1} \cup P_{D2} \cup \dots \cup P_{Dn} \cup BF_I \cup BF_J \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } D \text{ devido a atuação da proteção } P_{D1}, \text{ ou } P_{D2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Dn}, \text{ ou } BF_I \text{ ou } BF_J) \quad (2-3.e)$$

$$O_E = P_{E1} \cup P_{E2} \cup \dots \cup P_{En} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } E \text{ devido a atuação da proteção } P_{E1}, \text{ ou } P_{E2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{En}) \quad (2-3.f)$$

$$O_F = P_{F1} \cup P_{F2} \cup \dots \cup P_{Fn} \cup BF_L \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } F \text{ devido a atuação da proteção } P_{F1}, \text{ ou } P_{F2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Fn}, \text{ ou } BF_L) \quad (2-3.g)$$

$$O_G = P_{G1} \cup P_{G2} \cup \dots \cup P_{Gn} \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } G \text{ devido a atuação da proteção } P_{G1}, \text{ ou } P_{G2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Gn}) \quad (2-3.h)$$

$$O_H = P_{H1} \cup P_{H2} \cup \dots \cup P_{Hn} \cup BF_M \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } H \text{ devido a atuação da proteção } P_{H1}, \text{ ou } P_{H2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Hn}, \text{ ou } BF_M) \quad (2-3.i)$$

$$O_B = P_{B1} \cup P_{B2} \cup \dots \cup P_{Bn} \cup BF_D \cup BF_E \cup BF_F \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } D \text{ devido a atuação da proteção } P_{B1}, \text{ ou } P_{B2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Bn}, \text{ ou } BF_D \text{ ou } BF_E \text{ ou } BF_F) \quad (2-3.j)$$

$$O_C = P_{C1} \cup P_{C2} \cup \dots \cup P_{Cn} \cup BF_G \cup BF_H \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } C \text{ devido à atuação da proteção } P_{C1}, \text{ ou } P_{C2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{Cn}, \text{ ou } BF_G \text{ ou } BF_H) \quad (2-3.k)$$

$$O_A = P_{A1} \cup P_{A2} \cup \dots \cup P_{An} \cup BF_B \cup BF_C \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } A \text{ devido a atuação da proteção } P_{A1}, \text{ ou } P_{A2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{An}, \text{ ou } BF_B \text{ ou } BF_C) \quad (2-3.l)$$

Em sistemas elétricos, as equações acima são sintetizadas no formato de diagrama de blocos, conhecido como Diagrama Unifilar de Atuação das Proteções.

A prática da lógica, exposta anteriormente, ocorre da seguinte maneira: após a ocorrência de uma falha elétrica em um sistema, observando-se quais elementos de seccionamento foram operados por proteção, e confrontando-se a lista de alarmes e proteções

sinalizados com a lista de proteções que operam cada elemento, encontra-se qual o motivo da falha. Esta informação é fundamental para que o operador possa decidir se retorna ou não a carga.

Para possibilitar ao operador uma interpretação rápida e correta dos alarmes e proteções sinalizados, é necessário se ter identificações de falhas padronizadas para todos os equipamentos, e com descritivos curtos, mas que não necessitem de explicações para compreensão de todos. Com essa finalidade, existe a nomenclatura de normatização americana denominada ANSI (*American National Standard Institute*), usada mundialmente para classificar as diversas proteções quanto a sua função desempenhada. Através de um número entre 1 e 99, pode-se interpretar as diversas proteções de diferentes equipamentos, de uma maneira rápida e segura.

Um exemplo desta nomenclatura pode ser visto na Fig. 2.2. Além do código ANSI, há várias outras informações necessárias para se descrever cada proteção P_{xy} . Estas informações complementares podem ser classificadas, quanto à sua finalidade, em operacionais e de manutenção. As informações operacionais incluem a identificação da proteção (conhecida industrialmente como *tag*), as sinalizações, suas funções, seu objetivo, seu significado, onde a proteção atua, e pode incluir até instruções operacionais do tipo: “O que fazer quando esta proteção operar?”. Já as informações de manutenção incluem o tipo e características da proteção, seu fabricante, seu ajuste, relações RTP/RTC e outras informações úteis para manutenção desta proteção.

Figura 2.2 - Exemplo de codificação ANSI

Código	Função
25	Sincronismo
27	Subtensão
32	Direcional de fluxo de potência
50	Sobrecorrente instantânea
51	Sobrecorrente temporizada
59	Sobretensão
59N	Sobretensão de neutro
64	Sobrecorrente de carcaça
67	Direcional de sobrecorrente
81	Subfrequência
86	Relé de bloqueio
87	Diferencial
90V	Dispositivo de regulação de tensão
95	Dispositivo de alívio de pressão

Um aspecto até agora não comentado, é o da necessidade de uma metodologia de avaliação dos alarmes e proteções sinalizados durante a ocorrência de uma falha elétrica, pois como já foi visto e exemplificado, o seccionamento de elementos de um nível superior acarreta a interrupção no fornecimento de vários outros elementos de níveis inferiores, provocando sinalizações de defeito e atuações de proteções, que caso não sejam interpretados como consequência da atuação de outra proteção, e sim como a causa da falha, podem confundir o operador e provocar problemas bem mais sérios na tentativa de normalização do sistema.

Isto nos leva à compreensão da obrigatoriedade de uma hierarquia na análise de proteções. A partir das equações (2-3), desenvolvida do exemplo da Fig. 2.1, pode-se montar a árvore hierarquizada das causas genéricas de falhas, vista na Fig. 2.3. Esta árvore permite que se observe a hierarquia das proteções, servindo de guia ao operador durante o restabelecimento do sistema elétrico.

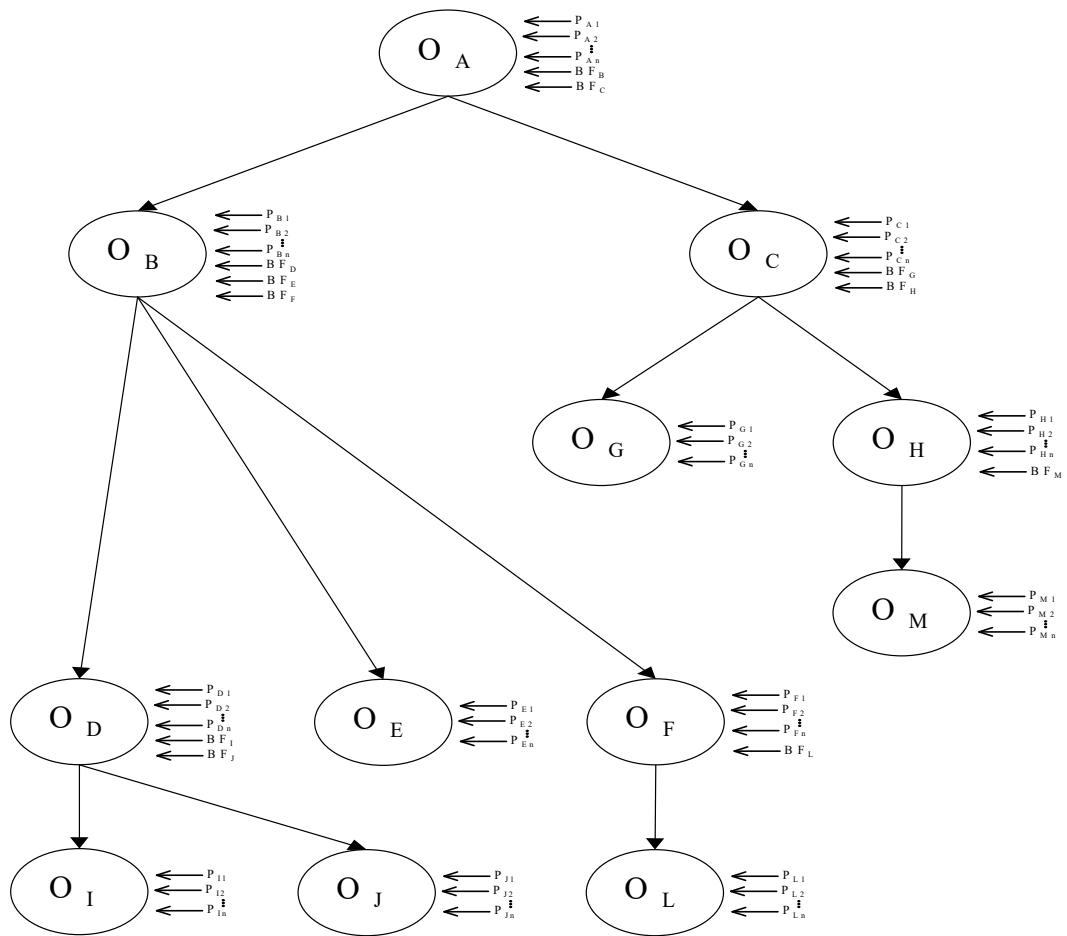
2.3 Formatação de regras

Como foi visto na seção anterior, para se encontrar o motivo de uma falha em um sistema elétrico, devem-se observar quais elementos de seccionamento foram abertos com a falha, e quais alarmes e proteções sinalizaram. Mostrou-se a necessidade de análise hierarquizada destes alarmes e proteções, visando evitar que interrupções elétricas em elementos de níveis inferiores, provocadas pelo seccionamento de elementos de níveis superiores, sejam interpretadas como causa da falha, e não como consequência.

Analisando-se as equações (2-1 a 2-3), que representam as formas de atuação das proteções P_{xy} nos elementos de seccionamento x , observa-se a existência de uma lógica *booleana* de condições dos alarmes e proteções, que pode ser interpretada como um conjunto de regras. Por exemplo, a equação (2-3.1):

$$O_A = P_{A1} \cup P_{A2} \cup \dots \cup P_{An} \cup BF_B \cup BF_C \quad (\text{lê-se: a proteção operou em } A \text{ devido à atuação da proteção } P_{A1}, \text{ ou } P_{A2}, \text{ ou } \dots \text{ ou } P_{An}, \text{ ou } BF_B \text{ ou } BF_C)$$

Figura 2.3 - Árvore hierarquizada das causas genéricas de falhas



Neste formato de regras, seria representada como:

SE	P_{A1}		
OU	P_{A2}		
OU	...		
		OU	P_{An}
OU	BF_B		
OU	BF_C		
ENTÃO	O_A		

Da mesma maneira, poderia-se representar qualquer outra equação de (2-1) a (2-3).

A partir destas regras, pode-se desenvolver um sistema computacional inteligente, que simularia a lógica de raciocínio de um operador na análise das causas-raízes das falhas elétricas, baseado nos esquemas de proteções encontrados nos diagramas de blocos de proteções do sistema. Este sistema inteligente funcionaria bem quando as falhas surgidas são

resguardadas por proteções constantes nos diagramas, mas não funcionaria (ou funcionaria de maneira bastante ineficiente) na geração de um diagnóstico de falhas secundárias, não vislumbradas por proteções específicas, ou apenas sinalizadas por relés auxiliares.

Uma alternativa para resolver este problema de ineficiência no diagnóstico de falhas secundárias seria a de se compilar no conjunto de regras, toda a lógica necessária para operação de cada elemento de seccionamento. Esta lógica está presente nos diagramas esquemáticos existentes de maneira generalizada em sistemas elétricos. O problema desta alternativa é que, devido ao alto custo econômico, quase nunca se tem monitoramento *on-line* dos *status* dos relés auxiliares, o que inviabiliza de imediato uma aplicação prática desta alternativa. Além disto, o conjunto de regras necessitaria de complexas modificações, toda vez que fosse implementada qualquer mudança na lógica destas proteções.

Outro ponto importante a salientar é que a lógica mostrada em (2-1) a (2-3) pouco contribui para avaliações qualitativas ou quantitativas de causas principais de falhas, avaliações estas muito utilizadas em estudos operacionais, de projeto, ou em elaborações de planos periódicos de manutenções. Isto se deve ao fato de que esta lógica se baseia em informações de diagramas de blocos de proteções, cujo foco principal é mostrar as proteções que atuam em cada elemento de seccionamento do sistema elétrico.

Portanto, propõe-se a construção de um conjunto de regras a partir de uma estrutura hierarquizada de árvore de falhas, ao invés dos *status* dos elementos de seccionamento. Tal proposição se justifica pelo fato de que a estrutura hierárquica possui, conforme será visto no capítulo 4, uma distribuição de falhas por tipos correlacionados, tais como níveis de tensão dos equipamentos, localização física e funções operacionais, sendo que cada tipo de falha pode ser classificado segundo modos de falha padronizados. Desta forma, combinaríamos, no mesmo sistema inteligente, as seguintes vantagens:

- Diagnóstico de falhas resguardadas por proteções tanto primárias quanto secundárias, útil na sua correção imediata;
- A predisposição de uma estrutura preparada para avaliar estatisticamente falhas correlacionadas, com possibilidade de atualização *on-line* a cada falha. Esta estrutura é muito importante em avaliações pós-falhas.

2.4 Falhas elétricas e seus modos

Como já mencionado, as empresas estão buscando estabelecer políticas de melhoramento de confiabilidade, visando reduzir custos de manutenção e indisponibilidades operacionais. Os princípios de confiabilidade mostram que um sistema é tão forte quanto o seu elo mais fraco. Idéias como confiança, sem falhas, durável e pronto para operar, estão fortemente relacionadas ao conceito de confiabilidade de um dado componente e/ou.

Formalmente, o sistema pode ser definido como um arranjo ordenado de componentes interrelacionados, que atuam e interagem para realizar uma tarefa ou função, em um meio-ambiente particular, e por um período de tempo determinado. Já a confiabilidade deste sistema, pode ser definida como *a habilidade de um item em realizar uma função requerida sob condições especificadas e por um período de tempo também especificado*.

Em sistemas de distribuição de energia, tem-se observado que uma das causas principais causas dos altos custos de manutenção corretiva e da indisponibilidade das plantas, é a falta de confiabilidade de subsistemas e/ou de componentes específicos. Isto tem justificado o estabelecimento de políticas de confiabilidade em empresas. Estas políticas visam:

- Reduzir o número de paradas provocadas por falhas das unidades existentes;
- Aumento da segurança destas unidades (redução de incidentes);
- Aumento da disponibilidade das unidades;
- Redução do número de erros humanos;
- Redução dos custos globais de novas unidades;
- Redefinição das políticas de manutenção, tomando como base o conceito de confiabilidade, como por exemplo, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).

Para este estudo, componente elétrico é qualquer parte de um equipamento ou sistema elétrico, e falha é a perda total ou parcial de um componente, ou ainda a modificação nas propriedades deste componente, que provoque a redução total ou parcial de suas condições de uso.

Em **Erro! Fonte de referência não encontrada.** encontra-se a seguinte definição de falha em um sistema de potência: *qualquer problema com um componente deste sistema, que cause qualquer um dos seguintes efeitos:*

- (1) *Desligamento total ou parcial da planta, ou que submeta a planta a operar abaixo de níveis aceitáveis;*
- (2) *Desempenho inaceitável de equipamentos do usuário;*
- (3) *Operação de proteções elétricas, ou operação em emergência do sistema elétrico da planta;*
- (4) *Desligamento de qualquer circuito ou equipamento elétrico.*

Modos de falhas de componentes elétricos

Modo de falha é a maneira pela qual uma falha é observada. Componentes de sistemas elétricos, tais como transformadores, disjuntores, linhas de transmissão e isoladores, estão sujeitos a diferentes modos de falhas, cujas conseqüências ao sistema são diferentes entre si.

Os modos de falhas mais importantes de um dado componente são aqueles eventos que causam ao componente a sua indisponibilidade operacional, normalmente devido a uma falha, e a subsequente isolação do componente falho por um equipamento de proteção. Por exemplo, para um disjuntor de cubículo blindado ou tipo fixo, têm-se como modos de falhas mais significativos **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

1. Falha no fechamento;
2. Falha na abertura;
3. Abertura indevida;
4. Dano durante abertura completada com sucesso;
5. Dano durante fechamento;
6. Falha em serviço (nem em abertura nem em fechamento);
7. Falha durante testes ou manutenção;
8. Dano descoberto durante testes ou manutenção.

Taxa de falha (λ), expressa como falhas por ano por componente, e MTTR (*Mean Time To Repair* - Tempo Médio de Reparo), são normalmente os parâmetros mais importantes para se caracterizar a falha de um componente elétrico.

Instituições de renome, tal como IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), SYREL (System Reliability Data Bank – UK), EUREDATA (European Reliability Data Bank Association) e OREDA (Offshore Reliability Data Bank), mantêm bancos de dados atualizados periodicamente, de taxas de falhas genéricas de equipamentos elétricos, taxas essas normalmente estratificadas em diferentes modos de falha significantes por equipamento. Estas taxas de falhas são obtidas através de levantamentos mundiais de campo, via relatórios de falhas enviados. Informações detalhadas da forma de obtenção destas taxas de falhas genéricas são apresentadas na referência **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Estas taxas de falhas genéricas, combinadas com dados específicos da planta em estudo (evidências), formam a taxa de falha específica da planta, através de um processo estatístico conhecido como *especialização*, que é melhor descrito na referência [36].

O conhecimento dos modos de falhas dos equipamentos e componentes do sistema permite a otimização do planejamento da manutenção, melhorando os resultados e reduzindo os custos. Mas se faz importante salientar que nem todo modo de falha pode ser evitado através de manutenção. Alguns exigem mudanças, tais como de projeto e forma de operação.

Para o desenvolvimento da aplicação deste trabalho, consideraram-se os seguintes componentes e modos de falhas:

- Banco de baterias de chumbo: Todos os modos;
- Banco de capacitores: Todos os modos;
- Barramentos: Curto-circuito e fuga para terra;
- Bombas de óleo dos trafos: Pára de funcionar;
- Cabos de alimentação: Curto-circuito e circuito aberto (mau contato em conexões terminais);
- Chaves fusível: Queima do fusível, circuito aberto (mau contato na chave);
- Chaves seccionadoras: Curto-circuito, mau contato ou circuito aberto, desajuste nos contatos auxiliares;
- Chaves seletoras e de transferência: Mau contato;
- Conexões terminais e intermediárias: Mau contato ou circuito aberto;
- Contatores: Queima de bobina e atuação indevida;
- Disjuntores: Não abre, não fecha, atuação indevida;
- Exaustores: Pára de funcionar, mau contato em conexões;
- Filtro de ar: Entupimento;

- Motor: Pára de funcionar;
- Pára-raios: Perda de isolamento das buchas, buchas com fuga para terra;
- Relés auxiliares: Falha em operar, queima da bobina, atuação indevida;
- Relés: Falha em operar, atuação indevida;
- Retificador: Falha no circuito eletrônico, mau contato em conexões, queima de 2 ou mais diodos, *flash over*, fuga de corrente de carcaça;
- Transformadores de potência: Curto-circuito, circuito aberto, fuga de corrente de carcaça;
- Transformador de Potencial (TP): Curto-circuito e circuito aberto;
- Ventiladores: Pára de funcionar.

2.5 Árvore de falhas

A Árvore de Falhas (ou FTA - *Fault Tree Analysis*) é uma técnica pela qual se estabelece um evento indesejado inicial, denominado evento topo, e desenvolve-se a partir daí uma lógica booleana em busca das possíveis causas deste evento, possibilitando a identificação e controle posterior destas causas, tanto no aspecto qualitativo quanto quantitativo. Ela pode ser definida como 0: *uma representação gráfica da lógica booleana, associada com o desenvolvimento de uma determinada falha no sistema, chamada de evento prioritário e relacionado a falhas básicas, chamadas de eventos primários.*

O conceito de FTA nasceu com os estudos associados ao sistema de controle de lançamento do míssil MINUTEMAN, em 1961, originado por H. A. Watson, dos Laboratórios Bell. Posteriormente, a Boeing Company modificou o conceito para utilizá-lo em computadores nos aviões. Em 1965, D. F. Haasl desenvolveu a técnica de construção de árvores de falha e sua aplicação para uma ampla variedade de problemas de segurança e confiabilidade de sistemas industriais, sendo que sua utilização efetiva ocorreu apenas na década de 70, na análise de confiabilidade de reatores nucleares.

O foco na análise via árvore de falhas é normalmente uma falha significativa, ou um evento catastrófico, que para esta análise é referido como evento topo, por aparecer no diagrama da árvore.

Sabendo-se quais os eventos que levam ao evento topo, empregam-se os operadores *booleanos* E (ou *AND*, representado pelo símbolo ●) e OU (ou *OR*, representado pelo símbolo +), para conectar estes eventos ao evento topo. O operador E é utilizado quando

todas as entradas devem falhar, para que a saída seja um evento indesejável, e o operador OU, quando qualquer entrada acarrete este evento indesejável. A partir desta ramificação inicial, criam-se novos ramos inferiores, até se chegar aos eventos primários (denominados eventos básicos), ou em eventos nos quais não há interesse em se aprofundar, eventos estes denominados eventos não desenvolvidos. Uma árvore de falhas típica possui a estrutura mostrada na Fig. 2.4. De maneira em geral, as etapas para se construir uma árvore de falhas são:

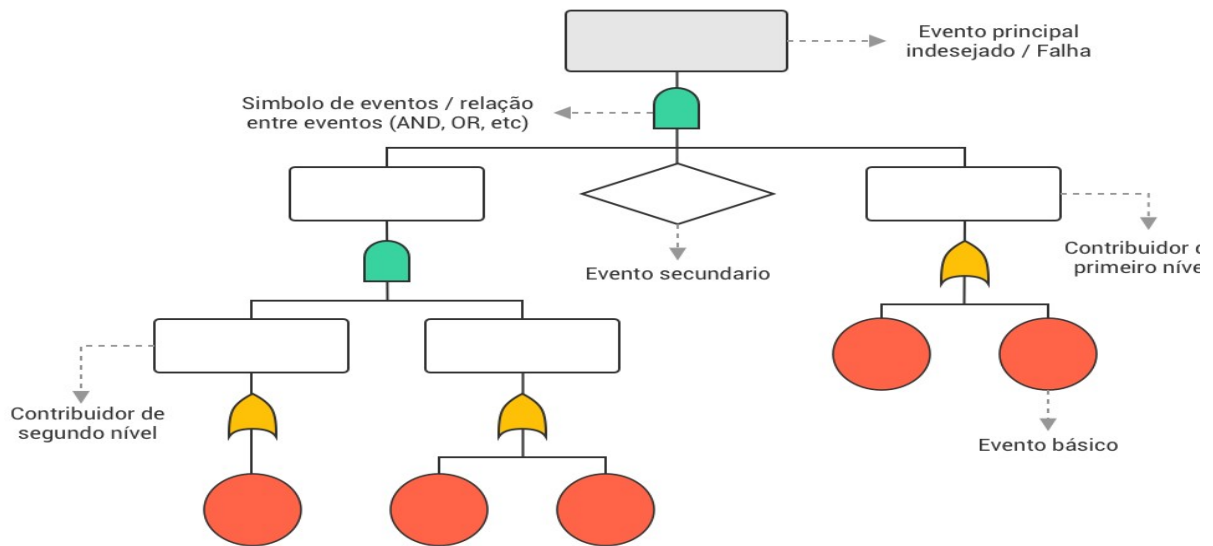
1. Definição objetiva do evento topo;
2. Análise detalhada dos dados e informações sobre os equipamentos e sistema em estudo;
3. Definição das premissas a serem adotadas na construção da árvore de falhas;
4. Construção da árvore de falhas a partir do evento topo, utilizando-se dos operadores lógicos E e OU;
5. Análise da árvore de falhas com base nos dados de falhas pertinentes a cada evento básico.

Análise qualitativa de uma FTA

Uma forma de análise qualitativa da FTA é a utilização de cortes mínimos, que consiste num conjunto de eventos básicos, cujas ocorrências simultâneas causam a ocorrência do evento topo. Num corte mínimo, não há eventos desnecessários, isto é, todos os eventos neste corte devem ocorrer, para causar o evento topo. Toda FTA possui um número finito de cortes mínimos, visto que há um número finito de eventos [37].

A obtenção destes cortes é conseguida a partir da expansão de eventos. Detalhes maiores sobre cortes mínimos podem ser vistos na referência 0.

Figura 2.4 – Estrutura Típica de uma Árvore de Falhas



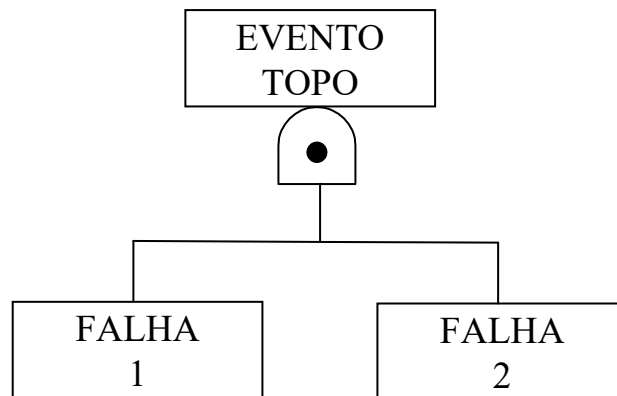
Análise quantitativa de uma FTA

Depois de construída a árvore de falhas, associando-se uma probabilidade de falha para cada evento primário, obtém-se a probabilidade de falha do evento topo, bem como de qualquer ramo da árvore. Isto é uma importante ferramenta quando se está procurando aumentar a confiabilidade de um sistema, pois permite uma análise detalhada do impacto de cada subsistema na confiabilidade global.

Os cálculos das probabilidades dos ramos são obtidos a partir das equações encontradas na teoria de estatística 0. A probabilidade P de dois eventos $F1$ (Falha 1) e $F2$ (Falha 2) levarem a um evento ET (Evento Topo) é dada pelas seguintes hipóteses:

- Hipótese 1:** Quando ambos os eventos precisarem ocorrer para se obter a saída (comando E). Neste caso considera-se que os eventos são independentes entre si, isto é, a ocorrência de um não influencia a ocorrência do outro. Neste caso, $P(ET) = P(F1) \cdot P(F2)$, conforme a representação gráfica mostrada na Fig. 2.5.

Figura 2.5 - A probabilidade do evento topo é o produto das probabilidades individuais



Hipótese 2: Quando qualquer uma das entradas acarretarem a saída (comando OU). Neste caso, considera-se que os eventos não são mutuamente excludentes, isto é, é possível a ocorrência conjunta de ambos. Neste caso, $P(ET) = P(F1) + P(F2) - P(F1) \cdot P(F2)$, conforme a representação gráfica mostrada na Fig. 2.6.

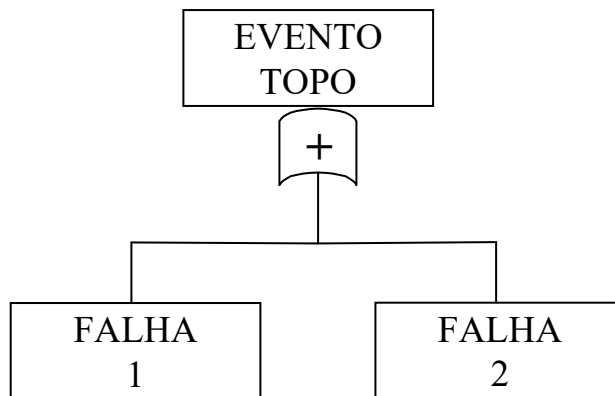
Generalizando-se para o caso de n eventos de falha $F1, F2, \dots, Fn$ levarem ao evento topo ET, as equações ficam escritas como:

$$P(ET) = P(F1) \cdot P(F2) \cdot \dots \cdot P(Fn) = \prod_{i=1}^{i=n} P(F_i)$$

$$P(ET) = P(F1 + F2 + \dots + Fn) = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} (1 - P(F_i))$$

Como uma ilustração do método de representação por FTA, considere o diagrama de configuração do sistema elétrico utilizado na aplicação. Seja o evento indesejado a *Atuação Relé Bloqueio 86T1*, este evento pode acontecer por falha *Falha Relé Bloqueio 86T1*, ou por *Atuação Relé Bulscholtz 63T1*. Já a *Atuação Relé Bulscholtz 63T1* pode acontecer pela *falha relé 63T1* ou pelo *Curto-Circuito enrolamento Trafo 02T1*, conforme representado na Fig. 2.7.

Figura 2.6 - A probabilidade do evento topo é a soma das probabilidades individuais subtraída da probabilidade da interseção



Como se pode observar, o evento indesejado ocorrerá de três maneiras:

- Se ocorrer a Falha no Relé 63T1 (Evento **A**).
- Se ocorrer a Curto-Circuito nos Enrolamentos do Trafo 02T1 (Evento **B**).
- Se ocorrer a Falha Relé 86T1 (Evento **C**).

Seja $p(x)$ a probabilidade da ocorrência do evento x . Para os eventos do exemplo da Fig. 2.8 tem-se que:

$$p(\text{falha relé } 63T1) = p(\mathbf{A}) = 3 \times 10^{-6}$$

$$p(\text{Curto-Circuito enrolamento Trafo } 02T1) = p(\mathbf{B}) = 3 \times 10^{-6}$$

$$p(\text{Falha Relé } 86T1) = p(\mathbf{C}) = 7 \times 10^{-9}$$

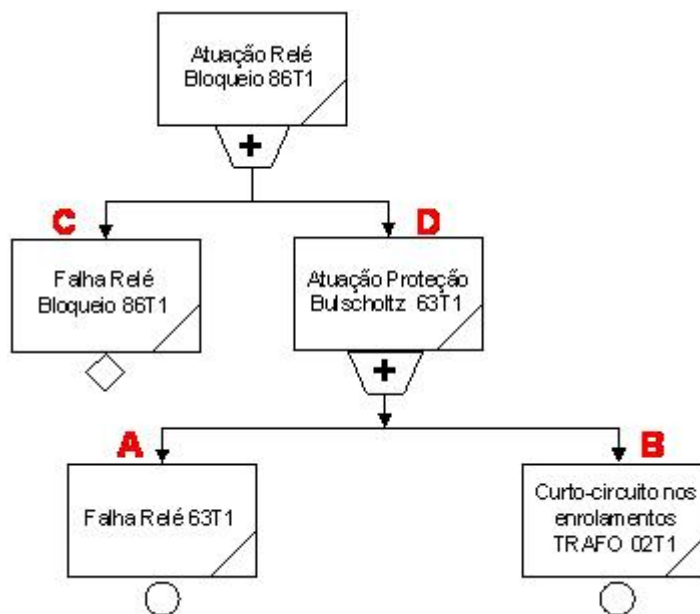
A probabilidade da ocorrência do evento secundário *Atuação Relé Bulscholtz 63T1* pode ser calculado através da expressão:

$$\begin{aligned} p(\text{Atuação Relé Bulscholtz } 63T1) &= p(\mathbf{D}) = p(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = p(\mathbf{A}) + p(\mathbf{B}) - \\ p(\mathbf{A}).p(\mathbf{B}) &= (3 \times 10^{-6}) + (3 \times 10^{-6}) - ((3 \times 10^{-6}).(3 \times 10^{-6})) \cong (6 \times 10^{-6}) - \\ &- (9 \times 10^{-12}) \cong \underline{6 \times 10^{-6}} \end{aligned}$$

Do mesmo modo, a probabilidade da ocorrência do evento topo *Atuação Relé Bloqueio 86T1* pode ser calculado através da expressão:

$$\begin{aligned} p(\text{Atuação Relé Bloqueio } 86T1) &= p(\mathbf{C} + \mathbf{D}) = p(\mathbf{C}) + p(\mathbf{D}) - p(\mathbf{C}).p(\mathbf{D}) = \\ &= (6 \times 10^{-6}) + (7 \times 10^{-9}) - ((6 \times 10^{-6}).(7 \times 10^{-9})) \cong (6 \times 10^{-6}) - (4 \times 10^{-14}) \cong \\ &\cong \underline{6 \times 10^{-6}} \end{aligned}$$

Figura 2.7 - Exemplo de representação por FTA



Portanto, a probabilidade de ocorrência da atuação do relé 86T1 de entrada é de 6×10^{-6} .

Maiores detalhes sobre análise por árvore de falhas podem ser vistos na referência 0.

2.6 Considerações finais

Neste capítulo, foi proposta a utilização do método de análise por árvore de falhas, a partir de diagrama de seletividade de um sistema elétrico genérico, visando à formatação de um conjunto de regras. Procurou-se evidenciar a necessidade de uma metodologia de análise hierarquizada de alarmes e proteções sinalizados durante a ocorrência de uma falha elétrica, evitando que interrupções elétricas em elementos de níveis inferiores, provocadas pelo seccionamento de elementos de níveis superiores, sejam interpretadas como causa da falha, e não como consequência.

Neste contexto, a proposta e implantação de um sistema computacional inteligente, que simularia a lógica de raciocínio do operador na obtenção das causas-raízes das falhas elétricas, se mostram de grande importância, tendo em vista a quantidade e complexidade das informações durante uma ocorrência, bem como o controle emocional exigido, servindo como uma excelente ferramenta de suporte à decisão deste operador.

3 SISTEMAS ESPECIALISTAS - PRINCÍPIOS GERAIS

3.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentado o conceito de Sistemas Especialistas com relação a suas aplicações, evolução histórica, classificação, arquitetura básica, forma de operação e ferramentas de desenvolvimento, enfatizando seu emprego em sistemas elétricos de subestações. Neste sentido, o objetivo é ressaltar a fundamentação teórica que orientou o desenvolvimento do sistema especialista proposto, com ênfase na metodologia escolhida, que é a representação de conhecimento por regras de produção, com estratégia de controle de encadeamento para trás, e modo de operação *on-line*.

3.2 Inteligência artificial

Etimologicamente, a palavra inteligência vem do latim *inter* (entre) e *legere* (escolher), ou seja, inteligência significa a faculdade de escolher entre uma coisa e outra. Já a palavra artificial vem do latim *artificiale*, e significa algo não natural. Aurélio Buarque de Hollanda Ferreira, no Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa, define inteligência como a faculdade de compreender; ato de interpretar, e artificial como produzido por arte ou indústria; desnatural. Portanto, Inteligência Artificial (IA) é uma maneira de fazer com que as máquinas adquiram habilidades que simulem a inteligência humana.

Alan Turing 0 vislumbrou que o "computador ofereceria oportunidade ilimitada de progresso prático, incorporando inteligência em uma forma artificial". O nome Inteligência Artificial foi proposto em 1956, durante um encontro no Dartmouth College. Participaram deste encontro diversas pessoas consideradas hoje ícones da IA clássica, como Marvin Minsky, John McCarthy, Herbert Simon e Allan Newell 0. Mas, embora a área da IA seja estudada academicamente desde a década de 1950, somente recentemente despertou grande interesse, devido à sua aplicação comercial prática. Isto se deu como consequência do alto desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos nos equipamentos computacionais.

Os princípios teóricos da IA foram fundamentados inicialmente em duas abordagens distintas e concorrentes: a abordagem cognitiva e a conexionista [22] [27]. A abordagem cognitiva, também conhecida como descendente ou simbolista, baseia-se na representação algorítmica dos aspectos psicológicos do raciocínio humano (cognição). Como

exemplos de abordagem cognitiva, podem-se citar as regras de produção e a lógica dos predicados 0. Devido a sua grande difusão durante as últimas décadas, é referida também como o próprio termo inteligência artificial clássica. Já a abordagem conexionista, também conhecida como ascendente ou biológica, baseia-se no modelo de funcionamento do cérebro animal (principalmente o humano), dos neurônios e das conexões neurais. Como exemplo de abordagem conexionista, podemos citar as redes neurais.

Diversos campos de estudo surgiram desde então. Entre eles, podem-se citar os algoritmos genéticos, os sistemas nebulosos, os sistemas baseados em conhecimento, o raciocínio baseado em casos, e as redes neurais. Atualmente, existem diversas áreas de aplicação da IA, entre as quais se destacam as áreas de sistemas especialistas, aprendizagem, criação de esquemas de raciocínio para jogos, compreensão de linguagem natural, reconhecimento de padrões, robótica, simuladores e visão de computador.

3.3 Conceituação de Sistemas Especialistas

Conceitualmente, podem-se definir sistemas especialistas (SEs) como programas computacionais que simulam a lógica de raciocínio de especialistas humanos em algum domínio específico do conhecimento [15]. Entende-se por especialista a pessoa que tem um conhecimento especializado ou perícia numa certa área. Já tecnicamente, SEs são programas de computador estruturados de maneira a relacionar fatos (informações) conhecidos com conhecimentos especializados, codificados em uma forma de representação específica, de maneira a produzir soluções.

Os SEs diferem dos programas computacionais convencionais (PCCs) devido a sua arquitetura. Os PCCs são constituídos basicamente de um algoritmo, que define todos os passos de execução do programa, e de uma grande massa de dados, especialmente numérica. Já os SEs são constituídos de uma grande massa de conhecimento e de um mecanismo de inferência, que usualmente pode trabalhar com diferentes conjuntos de conhecimento. A grosso modo:

$$\text{PCC} = \text{Dado} + \text{Algoritmo}, \text{ e};$$

$$\text{SE} = \text{Conhecimento} + \text{Inferência}$$

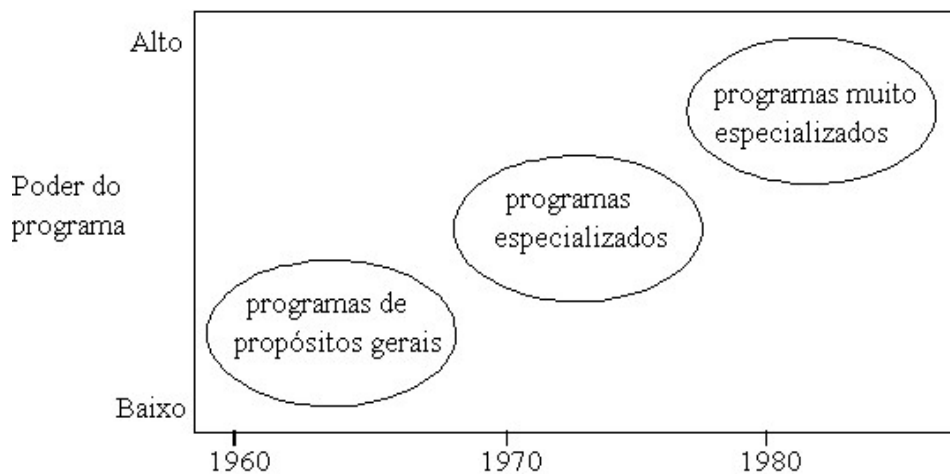
A característica mais importante de um SE é que ele depende de uma grande base de conhecimento 0. Outra característica do SE é a separação entre o conhecimento utilizado

para resolver o problema (que deverá ser capaz de crescer e mudar, conforme necessidade surgida pelo usuário) e o programa código que o manipula para a obtenção da solução. Este programa deverá ter sua execução bastante estável e ser projetado de maneira a poder trabalhar com diferentes conjuntos de conhecimento.

As primeiras pesquisas sobre SEs ocorreram em meados da década de 1960, na mesma época do declínio das pesquisas de simulação do processo de pensar, através dos métodos genéricos utilizados em programas de propósitos gerais, na época ainda muito rudimentar. Os sistemas baseados em IA eram capazes de encontrar soluções para problemas imaginários ou problemas bem estruturados, como jogos, mas em problemas reais e complexos, as técnicas levavam a falhas ou a explosões combinatórias que excediam as capacidades dos computadores 0.

Os cientistas de IA perceberam que o poder de um programa para solucionar um problema dependia do conhecimento que ele possui sobre a natureza do problema. A Fig. 3.1 0 mostra onde os SEs se encaixam no contexto histórico das pesquisas em IA.

Figura 3.1 - Histórico das pesquisas em IA

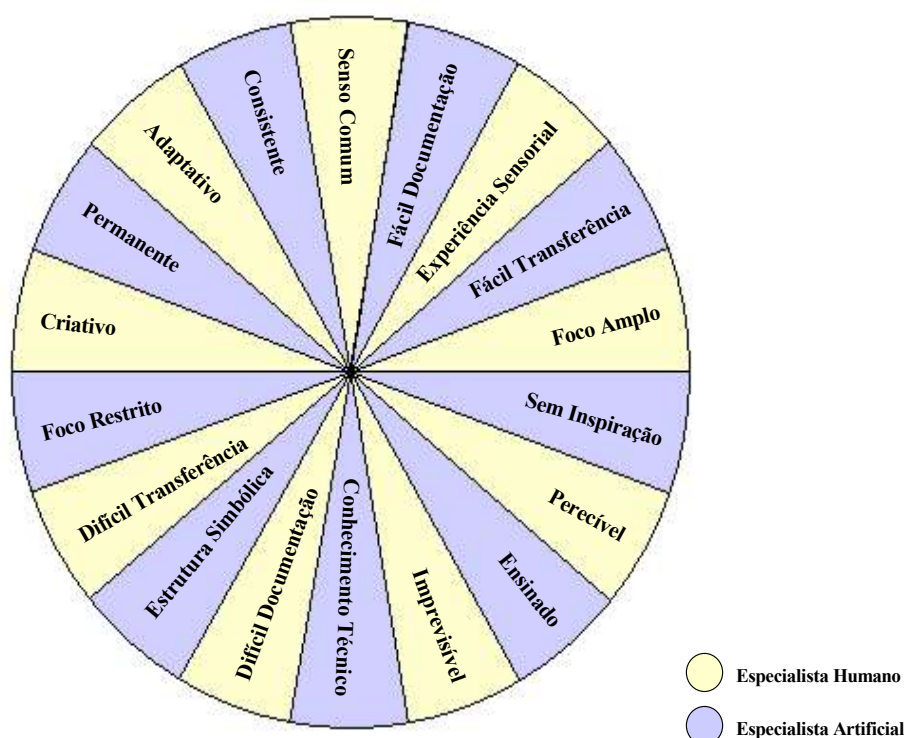


A partir de então, vários sistemas especialistas foram desenvolvidos, nas mais diversas áreas, tanto para fins acadêmicos quanto comerciais. Entre eles, pode-se citar o pioneiro DENDRAL (predição de estruturas de compostos químicos desconhecidos), o clássico MYCIN (terapia antimicrobiana), o PROSPECTOR (exploração geológica), o R1 (configuração de computadores VAX) e o ACE (manutenção de cabos telefônicos) 0. Atualmente, os SEs são utilizados para as mais diversas finalidades, tais como instrução, predição, controle, diagnóstico, projeto, planejamento e monitoramento, atingindo em alguns casos desempenho superior ao conhecimento de qualquer especialista humano individual. O

SE proposto neste trabalho é do tipo diagnóstico e predição, visto que se deduzem conseqüências a partir de situações, e possíveis problemas a partir de análises de dados.

É difícil falar-se em SEs sem fazer comparações, sejam técnicas ou filosóficas, do desempenho destes sistemas em relação aos especialistas humanos. A Fig. 3.2 mostra um comparativo das características de conhecimento dos especialistas humanos *versus* os especialistas artificiais.

Figura 3.2 - Características dos especialistas humanos *versus* os artificiais



Como se podem ver, especialistas artificiais possuem diversas características que os tornam superiores aos especialistas humanos, principalmente em relação à velocidade e exatidão na análise, disponibilidade de trabalho e uniformidade de análise nas tarefas repetitivas. Mas, devido às ausências totais de senso crítico e capacidade de adaptação, além de seu foco restrito, torna-se problemático seu uso em substituição aos especialistas humanos, principalmente em aplicações em sistemas elétricos, como a proposta neste trabalho, onde os riscos e custos envolvidos em uma falha são muito elevados. A solução para esta restrição é a combinação das vantagens de cada especialista, através da subordinação dos resultados do SE à análise de um especialista humano. Nestes casos, o SE operaria como um sistema de suporte à decisão.

3.4 Classificação e Controle dos Sistemas Especialistas

3.4.1 Classificação dos Sistemas Especialistas

Podem-se classificar os Sistemas Especialistas quanto às características do seu funcionamento. De um modo geral, tais categorias são listadas a seguir:

Interpretação - São sistemas que inferem descrições de situações a partir da observação de fatos fazendo uma análise de dados e procurando determinar as relações e seus significados. Devem considerar as possíveis interpretações, descartando as que se mostrarem inconsistentes.

Diagnósticos - São sistemas que detectam falhas oriundas da interpretação de dados. A análise dessas falhas pode conduzir a uma conclusão diferente da simples interpretação de dados. Detectam os problemas mascarados por falhas dos equipamentos e falhas do próprio diagnóstico, que este não detectou por ter falhado. Estes sistemas já têm embutidos o sistema de interpretação de dados.

Monitoramento - Interpreta as observações de sinais sobre o comportamento monitorado. Tem de verificar continuamente um determinado comportamento em limites pré-estabelecidos, sinalizando quando forem requeridas intervenções para o sucesso da execução. Um sinal poderá ser interpretado de maneiras diferentes, de acordo com a situação global percebida naquele momento, e a interpretação varia de acordo com os fatos que o sistema percebe a cada momento.

Predição - A partir de uma modelagem de dados do passado e do presente, este sistema permite uma determinada previsão do futuro. Como ele baseia sua solução na análise do comportamento dos dados recebidos no passado, de ter mecanismos para verificar os vários futuros possíveis, a partir da análise do comportamento desses dados, fazendo uso de raciocínios hipotéticos e verificando a tendência de acordo com a variação dos dados de entrada.

Planejamento - Neste caso, o sistema prepara um programa de iniciativas a serem tomadas para se atingir um determinado objetivo. São estabelecidas etapas e subetapas e, em caso de

etapas conflitantes, são definidas as prioridades. Estes tipos de SE, possuem características parecidas com os sistemas para a predição e normalmente opera em grandes problemas de solução complexa. O princípio de funcionamento, em alguns casos, é por tentativas de soluções, cabendo análise mais profunda ao especialista que trabalha com esse sistema. Eles enfocam os aspectos mais importantes e particiona de maneira coerente um problema em subproblemas menos complexos, estabelecendo sempre o relacionamento entre as metas destes subproblemas e a meta principal.

Projeto - Este sistema tem características parecidas com as do planejamento, e devem-se confeccionar especificações tais que sejam atendidos os objetivos dos requisitos particulares. É um sistema capaz de justificar a alternativa tomada para o projeto final, e de fazer uso dessa justificativa para alternativas futuras.

Depuração - Trata-se de sistemas que possuem mecanismos para fornecerem soluções para o mau funcionamento provocado por distorções de dados. Os mesmos provêm, de maneira automática, verificações nas diversas partes, incluindo mecanismos para ir validando cada etapa necessária em um processo qualquer.

Reparo - Este sistema desenvolve e executa planos para administrar os reparos verificados na etapa de diagnóstico. Um sistema especialista para reparos segue um plano para administrar alguma solução encontrada em uma etapa do diagnóstico. São poucos os sistemas desenvolvidos, porque o ato de executar um conserto em alguma coisa do mundo real é uma tarefa complexa.

Instrução - O sistema de instrução tem um mecanismo para verificar e corrigir o comportamento do aprendiz dos estudantes. Normalmente, este tipo de SE incorpora como subsistemas um sistema de diagnóstico e de reparo, e tomam por base uma descrição hipotética do conhecimento do aluno. Seu funcionamento consiste em ir interagindo com o treinando, em alguns casos apresentando uma pequena explicação e, a partir daí, ir sugerindo situações para serem analisadas pelo treinando. Dependendo do comportamento deste, se vai aumentando a complexidade das situações e encaminhando o assunto, de maneira didática, até o nível intelectual do treinamento.

Controle - É um sistema que governa o comportamento geral de outros sistemas (não apenas de computação). É o mais completo, de um modo geral, pois deve interpretar os fatos de uma

situação atual, verificando os dados passados e fazendo uma predição do futuro. Apresenta os diagnósticos de possíveis problemas, formulando um plano ótimo para sua correção. Este plano de correção é executado e monitorado para que o objetivo seja alcançado.

3.4.2 Regras de Produção do Sistema Especialista

Regras de Produção é a representação da base de conhecimento no formato de sentenças lógicas do tipo SE (condição é satisfeita) ENTÃO (ação é inferida ou executada). O par condição-ação é chamado de produção, dando origem ao nome Regras de Produção (RP). Por exemplo:

SE	Botão de Abertura Mecânica for Acionado
ENTÃO	Relé SEL 11T1 tem <i>status</i> igual a 1

Pode-se observar que as regras de produção são compostas por triplas O-A-V (Objeto-Atributo-Valor) ou, quando o objeto está implícito, por pares A-V. No exemplo da regra anterior:

Parte SE:

Objeto = Botão de Abertura Mecânica
Atributo = acionamento
Valor = 1 ou acionada

Parte ENTÃO:

Objeto = Relé SEL 11T1
Atributo = *status*
Valor = 1 ou atuado

As regras de produção podem possuir uma ou mais proposições, tanto na condição (parte SE), quanto na ação (parte ENTÃO). Na parte SE, as proposições podem ser ligadas através dos conectores *e* e *ou*, enquanto que na parte ENTÃO as proposições somente podem ser ligadas pelo conector *e*, visto tratar-se de conclusões que devem sempre ser verdadeiras. Por exemplo:

SE	Botão de Abertura Mecânica acionada
OU	Sinal de Corrente do TC além do limite permitido
ENTÃO	Relé SEL 11T1 tem <i>status</i> igual a 1

A operação de sistemas baseados em RPs é controlada por um procedimento que analisa os antecedentes (condição) das regras e executa seus conseqüentes (ação). A forma como estes antecedentes e conseqüentes se relacionam depende da estratégia de controle utilizada pelo sistema. Estas estratégias, descritas na seção 3.4.2, podem ser: encadeamento para frente, para trás, e misto.

Devido a seu formato estruturado, a representação da base de conhecimento por RPs facilita a inserção de novas regras para satisfazer novas situações, sem comprometer o funcionamento do sistema, além de ser facilmente implementada em qualquer linguagem de programação estruturada. As RPs são apropriadas para representar conhecimentos oriundos de recomendações, diretrizes, estratégias e quando o domínio do conhecimento é resultante de proposições empíricas, que foram desenvolvidas ao longo do tempo, através da experiência de especialistas na resolução de problemas 0.

A principal desvantagem da RP deve-se ao seu formato SE () ENTÃO () parcelar o conhecimento, o que nem sempre se adéqua ao modo de raciocínio humano, exigindo algumas vezes uma estruturação não otimizada da base de conhecimento (com um grande número de regras), principalmente na representação de estruturas mais complexas, provocando um baixo desempenho no sistema. Outras desvantagens significativas da RP são: a limitação em expressar a natureza fundamental de diversos campos, e a inadequação para descrição de objetos e relações entre eles, não permitindo a herança automática dos atributos, tal como na representação por quadros. No entanto, devido à sintaxe da RP ser bastante parecida com as tomadas de decisões pelo ser humano, é notadamente a representação de conhecimento mais empregada em SE, principalmente nos de pequeno porte.

Neste trabalho escolheu-se a RP como forma de representar o conhecimento do sistema especialista a ser proposto, devido a sua natureza formal e simples de representar todo o conhecimento, raciocínio, inferência e heurística necessária para se atingir a causa-raiz de uma falha elétrica, identificada a partir dos diversos alarmes e/ou sinalizações apresentadas como podem ser visto nos dois exemplos desta seção.

3.4.3 Estratégia de controle do Sistema Especialista

A estratégia de controle do SE impacta na rapidez e na possibilidade de solução do problema, visto que determina a forma com que o mecanismo de inferência seleciona e aplica a base de dados às regras. A estratégia deve causar dinamismo ao processo de busca, requisito à obtenção de resultados, e ser sistemática, evitando seqüências inúteis de busca. Ela é necessária para se evitar explosão combinatória no processo de busca.

As estratégias de controle tentam imitar os tipos de raciocínio que um especialista humano emprega na resolução de um problema, isto é, ele pode iniciar com evidências para chegar a uma conclusão (encadeamento para frente), pode começar com uma conclusão e procurar evidências que a comprovem (encadeamento para trás), ou pode fazer uma combinação destes (encadeamento misto). Cada uma dessas estratégias será discutida nos próximos itens. Existem outros métodos menos utilizados, tais como encadeamento lateral, análises de meios e fins, redução de problemas, *backtracking* e *plan-generate-test*. 0.

Encadeamento para frente (*forward chaining*)

A estratégia de Encadeamento para frente é também conhecida como progressiva, raciocínio antecedente, controle dirigido por dados ou controle *bottom up*.

Nesta estratégia de controle, o mecanismo de inferência analisa os antecedentes (parte SE) de todas as regras da base de regras, e seleciona, se houver, aquela que satisfaz a base de dados, executando seus conseqüentes (parte ENTÃO) e modificando a base de dados.

É importante ressaltar que, conforme foi explicado anteriormente, as regras são organizadas na base de regras de maneira hierarquizada, de forma que as metaregras (regras que descrevem como outras regras são usadas) possuem prioridade de execução, solucionando assim possíveis problemas de conflitos.

O mecanismo de inferência executa então o conjunto de regras que satisfaz a nova base de dados. Esta seqüência se repete até que a base de dados formada corresponda ao objetivo (Sucesso!) ou que mais nenhuma regra satisfaça a base de dados (Fracasso!).

Um exemplo de raciocínio de encadeamento para frente, voltado para sistemas de energia elétrica seria: Se a manopla do trip de emergência é acionada (fato), então o *status* do relé S86-24 muda de 0 para 1. Um exemplo de uma aplicação de sistema de produção com encadeamento para frente seria um sistema simulador de falhas de componentes e/ou subsistemas de um sistema, que poderia ser utilizado para treinar pessoas na detecção da falha e/ou avaliação da criticidade destes subsistemas na confiabilidade do sistema. Esta aplicação funcionaria a partir das informações de falhas de uma seqüência especificada de componentes e/ou subsistemas.

Encadeamento para trás (*backward chaining*)

A estratégia de Encadeamento para trás é também conhecida como retrocesso, raciocínio consequente, controle dirigido por objetivos ou controle *top down*.

Nesta estratégia de controle, o mecanismo de inferência trabalha de maneira inversa à do encadeamento para frente, analisando inicialmente os consequentes (parte ENTÃO) de todas as regras da base de regras, e selecionando, se houver, aquela que satisfaz a base de dados, executando, neste caso, seus antecedentes (parte SE) e modificando a base de dados.

Igualmente ao que ocorre no encadeamento para frente, no encadeamento para trás as regras são organizadas na Base de Regras de maneira hierarquizada.

Assim como no encadeamento para frente, o mecanismo de inferência executa então o conjunto de regras que satisfaz a nova base de dados. Esta seqüência se repete até que a base de dados formada corresponda ao objetivo (Sucesso!) ou que mais nenhuma regra satisfaça a base de dados (Fracasso!).

A maioria dos SEs baseados em regras de produção utiliza esta estratégia, visto que ela reduz espaço de busca e otimiza a execução de consultas.

O SE proposto neste trabalho é um sistema de diagnóstico de causas de desligamentos em sistemas elétricos de potência. Qualquer especialista humano iniciaria o processo de inferência com os consequentes (parte ENTÃO), e buscaria os antecedentes (parte SE), que para a aplicação é a causa-raiz do desligamento. Assim, a escolha do encadeamento para trás como estratégia de controle deste SE é um processo natural, e evita esforços computacionais desnecessários.

Encadeamento misto

A estratégia de Encadeamento misto é também conhecida como busca direcional. Nesta estratégia de controle, o mecanismo de inferência funciona de maneira mista, trabalhando simultaneamente tanto para frente, a partir da descrição das condições do sistema, como para trás, a partir da descrição dos objetivos, até que os dois caminhos se unam em algum lugar.

Esta estratégia é indicada em buscas onde o número de passos cresce exponencialmente em relação ao número de passos já tomados. Pohl [1] sugere que esta estratégia é “verdadeiramente eficaz” para casos de busca cega, e com “eficiência menos provável” para casos de busca informada (heurística).

Em alguns casos, as duas buscas poderão passar uma pela outra (ver Fig. 3.4). Nestes casos, muito mais passos serão necessários à obtenção do resultado, do que quaisquer um dos outros métodos necessitariam.

Figura 3.3 - Encadeamento misto, quando uma busca passa pela outra



3.4.4 Modos de operação

O SE pode ser classificado em relação ao seu modo de operação como *on-line*, se está conectado a um sistema físico e a sua atuação é em tempo real, ou *off-line*, caso a sua atuação não seja em tempo real.

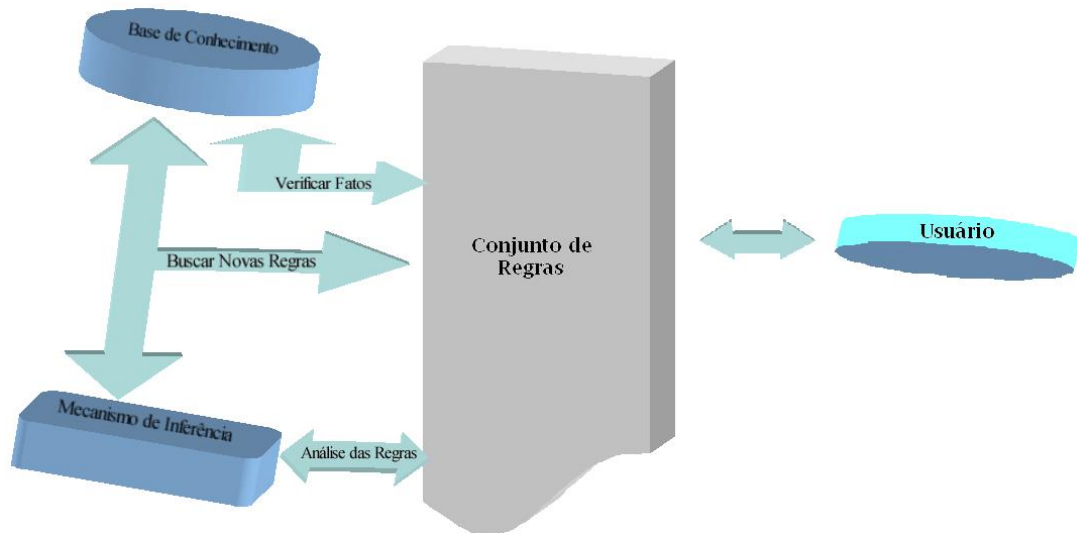
Como exemplo de SE *on-line*, podem-se citar sistemas de monitoração de tráfego de redes. Nestes sistemas, há necessidade de medição do desempenho da rede em tempo real, de forma que se possam executar, caso necessário, ações corretivas sem maiores danos, tal como direcionar para uma nova rota o tráfego de dados, após a queda ou congestionamento de outro roteador.

Já como exemplo de SE *off-line*, pode-se citar um sistema de suporte à prescrição de planos alimentares, que após o fornecimento dos dados necessários ao seu banco de conhecimento, não precisa ficar registrando todas as alimentações feitas por um dado indivíduo, em tempo real, para redirecionar suas prescrições.

3.5 Arquitetura básica de Sistemas Especialistas e forma de operação

Um modelo da arquitetura básica de SEs encontra-se ilustrado na Fig. 3.4 e compreende 4 componentes principais: base de conhecimentos, mecanismo de inferência e *interface* com o usuário. Cada um destes componentes será descrito a seguir.

Figura 3.4 - Arquitetura básica de um sistema especialista



Base de Conhecimentos

Sendo o SE um sistema que usa um conhecimento específico de seu domínio de aplicação, através de um programa de raciocínio relativamente simples, conclui-se que a base de conhecimentos é o seu componente mais importante. A sua qualidade impacta diretamente na capacidade do SE de resolver problemas.

A base de conhecimentos é o local onde se armazenam todos os conhecimentos (dados e regras) adquiridos dos especialistas, necessários para a resolução de um determinado problema. É formada pela base de dados e pelo conjunto de regras.

A base de dados contém os fatos (informações) pertinentes à tarefa, estruturados num dos diferentes tipos de RCs descritos na seção 3.4.1. Quando se está trabalhando com informações cujos valores são incertos, ou cujas regras são imprecisas, é comum aplicar alguma medida de confiabilidade às regras (normalmente um valor denominado *fator de certeza*).

O conjunto de regras determina a aplicabilidade da regra e descreve a ação a ser realizada caso a regra seja aplicada. Os conhecimentos do conjunto de regras são codificados no formato SE () ENTÃO (). As regras são hierarquizadas de maneira a solucionar problemas de conflitos, pois as metaregras têm prioridade na execução.

Em SEs baseados em regras de produção, esta base de conhecimentos é conhecida como Memória de Produção.

Mecanismo de Inferência

Mecanismo de inferência ou motor de inferência é um elemento permanente, que pode ser inclusive ser reutilizado por vários sistemas especialistas. É a parte responsável pela busca das regras da base de conhecimento para serem avaliadas, direcionando o processo de inferência. O conhecimento deve estar preparado para uma boa interpretação e os objetos devem estar em uma determinada ordem representada por uma árvore de contexto.

Basicamente o mecanismo de inferência é dividido em tarefas que são:

- (i) Selecionar e buscar
- (ii) Avaliar
- (iii) Procurar

Resumindo as tarefas acima, pode dizer que as regras necessárias para se chegar a uma meta devem ser buscadas na base de conhecimento. Essas regras serão colocadas no conjunto de regras, sendo que as regras já existentes só serão avaliadas depois das mais recentes. A ordem de avaliação no Conjunto de Regras obedece a uma estrutura do tipo pilha com o objetivo de atingir a meta mais recente. A regra continuará sendo avaliada enquanto as condições da premissa forem verdadeiras, caso contrário a regra será eliminada, a meta estabelecida e desempilhada e uma nova regra será carregada. Quando um valor de um parâmetro em um determinado contexto não é conhecido e não se encontra nas estruturas de pilha, deve-se então procurar novas informações na base de conhecimento, provocar a busca de novas regras ou perguntar diretamente ao usuário.

Considere o seguinte exemplo:

1. Os pais de Jim são João e Maria.
2. Os pais de Jane são João e Maria.

O objetivo é determinar o parentesco entre Jim e Jane. Existe um mecanismo chamado *poda* que se concentra em uma regra guardada em segurança no cérebro das pessoas

capazes de acabar com o mistério instantaneamente: SE uma pessoa do sexo masculino e uma pessoa do sexo feminino têm os mesmos pais, ENTÃO eles são irmãos.

Alcançamos nosso objetivo inferindo a resposta da pergunta sobre o parentesco entre Jim e Jane da regra que já havíamos aprendido anteriormente. E no processo de alcançar o objetivo, um novo fato é deduzido: Jim e Jane são irmãos. A parte da inteligência que nos ajudou a chegar a esse novo fato é chamada de *mecanismo de inferência*. Ele é central em nossa habilidade de aprender com a experiência porque nos permite gerar novos fatos a partir dos já existentes aplicando o conhecimento adquirido em novas situações. O mecanismo de inferência também ajuda a detectar erros de raciocínio e nos permite modificar e aprimorar as regras usadas, para alcançar nossos objetivos. Na Fig 3.5, tem-se um modelo simplificado de fluxograma de funcionamento do Mecanismo de Inferência.

Figura 3.5 – Fluxograma Mecanismo de Inferência



Interface com o Usuário

A *Interface com o Usuário* é a componente responsável pela interação entre o usuário e o SE. É projetada de modo a facilitar a operação dos SEs, permitindo entradas de dados, saídas em formato de perguntas, conclusões e justificativas. Algumas *interfaces* possuem até mecanismos de explicações do raciocínio que o sistema utilizou para obter uma conclusão.

Atualmente, estudos baseados nas teorias cognitivas vêm sendo feitos, voltados para novos projetos de *interface* homem-máquina de sistemas de IA.

Como exemplo de facilidade de *interface* com o usuário de um SE projetado para proteção de sistemas de energia elétrica, pode-se citar a tela dinâmica do diagrama elétrico unifilar do sistema de domínio, que permite ao usuário uma rápida visualização em tempo real da condição operacional deste sistema.

3.6 Ferramentas de programação para o desenvolvimento de Sistemas Especialistas

Existem dois tipos principais de ferramentas utilizadas no desenvolvimento de sistemas especialistas: linguagens de programação e linguagens de engenharia do conhecimento.

As linguagens de programação podem ser convencionais ou de inteligência artificial. As linguagens convencionais foram desenvolvidas objetivando a manipulação de expressões matemáticas. São tradutores de comandos, escritos numa determinada sintaxe. Como exemplo destas linguagens pode-se citar o JAVA, PHP, Python, Visual BASIC, FORTRAN, o C, o C++, o C#, o Pearl, e o PASCAL. Já as linguagens de inteligência artificial foram desenvolvidas objetivando a manipulação de expressões simbólicas. Como exemplo destas linguagens pode-se citar o LISP (LISTs Processing, estruturado em 1958, por John McCarthy), o PROLOG (PROgramming in LOGic, estruturado em 1973, pelo Grupo de IA de Colmerauer, da Universidade de Marselha) e o INTERLISP (um dialeto mais moderno e amplo do LISP). O desenvolvimento de SEs com linguagens de programação é trabalhoso e complexo. O programador, além de modelar a base de conhecimento, tem de programar o mecanismo de inferência que operará esta base. A vantagem do seu uso é o seu total poder de adequação às reais necessidades do usuário final, voltada inclusive para o ambiente de execução deste programa.

As linguagens de engenharia do conhecimento, também conhecidas como Geradores de Sistemas Especialistas (GSE) ou *shells* de sistemas especialistas, são ferramentas utilizadas para representar o conhecimento, prover o mecanismo de inferência para resolução do problema, e prover as *interfaces* de comunicação, tanto para o engenheiro de conhecimento, quanto para o usuário final. Seu uso simplifica significativamente o trabalho de desenvolvimento de um SE, reduzindo-o fundamentalmente ao fornecimento de conhecimentos necessários à base de conhecimentos. Já como desvantagens do uso de *shell*, podem-se citar: existência de curva inicial de aprendizado, preço maior, não aproveitamento

do conhecimento do usuário em outras ferramentas e funcionalidade não otimizada no desenvolvimento de aplicações, considerando-se as características do sistema operacional utilizado (algo que somente uma genuína e completa linguagem de programação pode oferecer).

Visando corrigir algumas destas limitações, muitos *shells* atualmente permitem a integração de regras e mecanismos de inferência em programas de linguagens de programação, possibilitando assim ao usuário uma maior adequação a sua necessidade, como também a construção de sua própria *interface*.

Existem atualmente diversos *shells* disponíveis¹, baseados em diferentes formas de representação de conhecimento e estratégias de controle, e compatíveis com diversas linguagens de programação. Alguns são de domínio público, outros são comerciais. Há *shells* de domínio público que podem ser utilizados para os mais diversos fins, desde educacionais, de pesquisa e diversão, até comerciais, dependendo do código de conduta, específico de cada um.

Como exemplos de *shells* de sistemas especialistas podem-se citar o clássico EMYCIN (derivado do Sistema MYCIN, pois nada mais é do que o Sistema MYCIN vazio, sem a sua base de conhecimento específica), o KAS (originado do Prospector), o KEE (Knowledge Engineering Environment), o Art, o OPS83, e o ExpertSINTA², ver FIG 3.7.

Não existe, a princípio, nenhuma regra ou restrição específica da linguagem a ser usada no desenvolvimento de um SE. A escolha deve ser baseada na adequação e expressividade da linguagem ou ferramenta com a respectiva aplicação, a disponibilidade desta linguagem ou ferramenta, e os benefícios esperados do uso de uma nova linguagem *versus* o tempo e esforço despendidos no seu entendimento e aprendizado.

De acordo com *TPCI*³ - *TIOBE Programming Community Index*, comunidade que quantifica o número de aplicações disponibilizadas no mercado mundial, as linguagens de programações mais utilizadas no desenvolvimento de aplicações em sistemas de energia elétrica, mais especificamente para operação de sistemas de potência, são JAVA (17,01%), C (16,28%), PHP (9,77%), C++ (9,17%), conforme Fig. 3.6. Já as linguagens de engenharia de

¹ A Escola de Ciência da Computação, da Universidade Carnegie Mellon, disponibiliza uma listagem completa, detalhada, com *links*, de diversos *shells*, tanto de domínio público, quanto comercial, na URL <http://www.cs.cmu.edu>.

² Desenvolvido pelo Laboratório de Inteligência Artificial, da Universidade Federal do Ceará, e disponibilizado na URL <http://www.lia.ufc.br>.

³ TIOBE Programming Community Index, disponibilizado na URL <http://www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html>

conhecimento mais usadas no setor de sistemas elétricos de potência são: ELIPSE, SAGE, ACTION VIEW e AXXION.

Figura 3.6 – Ranking das linguagens de programação mais usadas (Dezembro 2009)

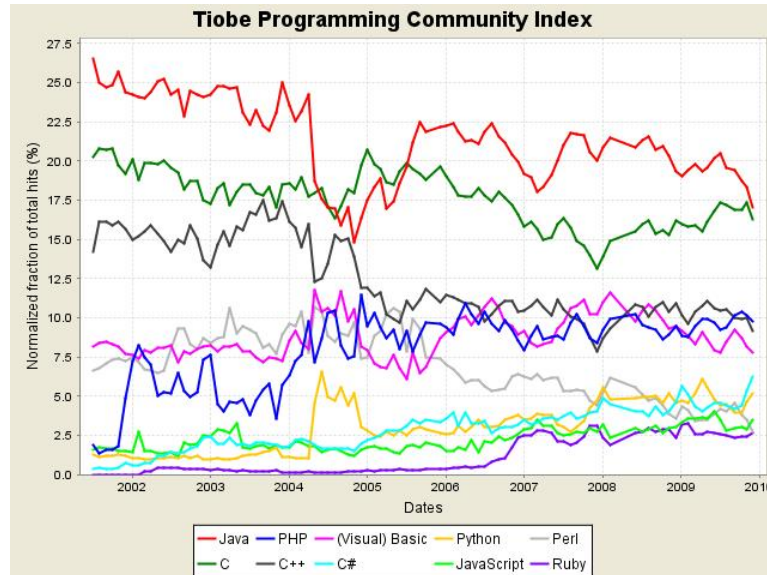
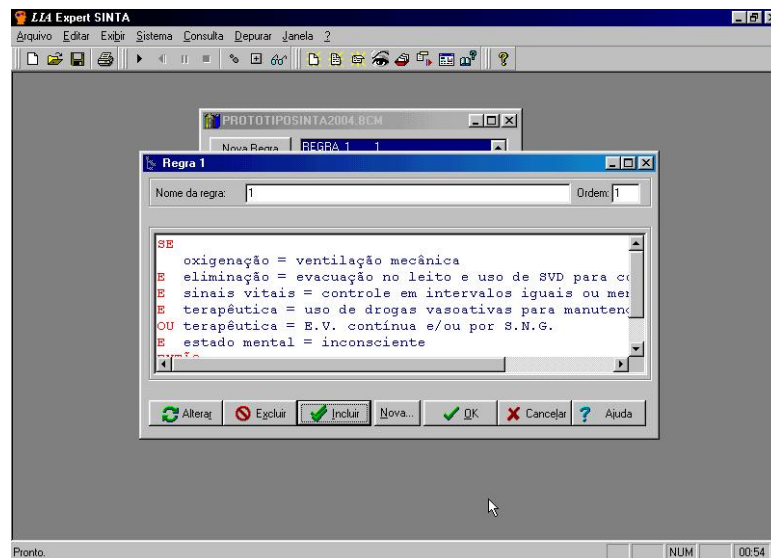


Figura 3.7 – Montagem de Regras usando o *SHELL* Expert SINTA



3.7 Sistemas Especialistas em sistemas de energia elétrica

Em sistemas de energia elétrica, as primeiras publicações em SEs surgiram em 1982. Um marco nesta área foi o lançamento do NPPC (Nuclear Power Plant Consultant), um sistema que auxiliava operadores a determinar as causas de eventos anormais, criado após o acidente na usina de Three Mile Island, ocorrido em março de 1979, no estado da Pensilvânia, nos Estados Unidos.

Em 1983, Sakaguchi e Matsumoto [1] publicaram uma proposta de um SE para restaurar o suprimento de energia (interrompido devido a um evento qualquer), sem causar sobrecarga nas linhas de transmissão. A partir de então, diversos trabalhos foram publicados em diversas áreas, como processamento de alarmes [2], diagnóstico de falhas [3], operação e controle de sistemas elétricos [4], restabelecimento do sistema [5], e projetos de sistemas elétricos [6].

De acordo com [7], a maioria das aplicações em sistemas de energia elétrica, mais especificamente sistemas de potência, estão concentradas em tarefas de monitoração, controle e planejamento.

No Brasil, o sistema elétrico vem sofrendo diversas mudanças. Os subsistemas regionais foram interligados, formando um sistema único, grande e complexo de operar. O consumo de energia elétrica vem aumentando acima da capacidade instalada, exigindo uma repotencialização acelerada do parque de geração e transmissão. Diversas modificações de regulamentações estão acontecendo, no sentido de abrir o setor elétrico às leis de mercado. As cobranças por parte da sociedade, em relação à qualidade dos serviços elétricos, aumentaram consideravelmente. Isso vem exigindo uma rápida reestruturação do setor elétrico. Há uma evidente carência de pessoal especializado no setor. Neste contexto, sistemas inteligentes, tais como sistemas especialistas, que venham a auxiliar a operação e supervisão de sistemas elétricos, possuem um futuro promissor. Entre as diversas funções que eles poderiam auxiliar, podem-se citar: formação profissional, diagnóstico de falhas, controle, monitoramento, processamento de alarmes, armazenamento de dados históricos, gráficos de tendência e registro seqüencial de eventos.

No caso da empresa CEMAR, onde será testado o sistema proposto neste trabalho, um SE seria de grande importância em aplicações de diagnóstico de falhas para restabelecimento do sistema, em análises estatísticas de falhas, além de poder ser bastante útil também em treinamentos de operadores, simulando operações reais.

3.8 Escolha do ELIPSE SOFTWARE.

Quando se avaliou a plataforma adequada para se desenvolver o sistema especialista, inicialmente foi considerada a geração de toda a programação em linguagem C, devido a sua grande difusão pelos sistemas já desenvolvido no mercado, e pela sua capacidade de aproveitamento pelo Software SCADA em uso atualmente na CEMAR, o ACTION VIEW. Tal alternativa foi descartada quando analisada a complexidade de fazer toda a lógica, e a visualização pouco amigável ao Especialista Humano (Operador de Sistema Elétrico).

Uma alternativa foi a utilização de um SHELL já pronto, que atendesse a necessidade da empresa em todos os seus pontos e filosofias de operação e proteção existente. Este SHELL deveria ser capaz de receber as árvores de falha de cada Subestação energia, e processá-las de acordo com a filosofia de diagnóstico em uso pela companhia. Tal opção foi também descartada, pois não foi encontrado um software no mercado que atendesse a todas as singularidades presentes nas diversas subestações da CEMAR, bem como o custo demasiado ostensivo para se desenvolver um software comercialmente específico.

A alternativa escolhida foi à aquisição de uma plataforma SCADA programável, em ambiente WINDOWS, capaz de se adaptar a todos os tipos e filosofias de proteção e operação do sistema elétrico existentes na CEMAR, com baixo custo, unindo no mesmo Software o sistema supervisor SCADA e o Sistema Especialista. Tal plataforma foi a ELIPSE SCADA, totalmente configurável pelo usuário, permite a monitoração de variáveis em tempo real, através de gráficos e objetos que estão relacionados com as variáveis físicas de campo. Também é possível fazer acionamentos e enviar ou receber informações para equipamentos de aquisição de dados. Além disto, através de sua exclusiva linguagem de programação, o *Eclipse Basic*, é possível automatizar diversas tarefas a fim de atender as necessidades específicas de nossa empresa.

O desenvolvimento de uma aplicação no Elipse SCADA é baseado na ferramenta interna chamada: **Organizer**. Ela permite uma visão simples e organizada de toda a aplicação, ajudando na edição e configuração de todos os objetos envolvidos no sistema através de uma árvore hierárquica. A estrutura do Organizer pode ser comparada à árvore de diretórios do Gerenciador de Arquivos do Windows. Desta forma, a estrutura da aplicação começa no canto superior esquerdo com a raiz da aplicação. Todos os objetos da aplicação descem a partir da raiz agrupados de acordo com seu tipo: Tags, Telas, Alarmes, Receitas, Históricos, Relatórios, Drivers, Databases, que constituem os principais elementos de sua aplicação. Selecionando-se qualquer um dos ramos da árvore da aplicação, ele irá se expandir, mostrando seu conteúdo; desta forma, você pode facilmente navegar pela aplicação tendo disponíveis todas as opções

de configuração desde a criação de Tags até o redimensionamento de objetos em uma tela específica.

Figura 3.8 – Árvore de classes e objetos no ORGANIZER



A partir do Organizer você pode criar toda a sua aplicação, simplesmente navegando através da árvore da aplicação. Selecionando-se qualquer um de seus ramos, as propriedades do objeto selecionado serão mostradas no lado direito da janela, onde poderão ser editadas. Por exemplo, se você selecionar Tags na árvore do Organizer você poderá criar novos Tags e editar suas propriedades selecionando a página desejada a partir das abas no topo da janela.

Além de fácil programação, como compartilha com o Sistema Supervisório os mesmo dados oriundo do Servidor de Histórico de Eventos, o Sistema Especialista Integrado é capaz de analisar eventos passados, antes mesmo de sua criação, auxiliando a melhorar os processos internos de Operação e Proteção.

3.9 Considerações finais

Este capítulo apresentou de uma maneira simplificada, os conceitos principais de Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas, direcionando-o para a metodologia escolhida de desenvolvimento do SE proposto, que é a representação de conhecimento por regras de produção, com estratégia de controle de encadeamento para trás, e modo de operação *on-line*.

Em sistemas elétricos de grande porte, a falha impacta diretamente nos objetivos de cumprimento de disponibilidade, a operação destes sistemas é crítica. O número de profissionais é pequeno, e o processo de treinamento deste pessoal é lento. Como mencionado

no Capítulo 1, a fluência dos operadores na detecção e correção de falhas, fator determinante no tempo de restabelecimento do sistema, depende diretamente de sua experiência, seja por tempo de serviço, ou por número de manobras de restabelecimento envolvidas que caracterizam falhas contínuas, inaceitáveis nas empresas de distribuição de energia elétrica.

Este é o caso da Cia Energética do Maranhão, responsável pelo fornecimento de energia elétrica a 6.300.000 habitantes, funciona com monitoramento ininterrupto de dois operadores, em turno de 6 horas, responsável, dentre outras coisas, por executar manobras de isolamento no sistema para manutenções, inspeções e outras atividades administrativas. O cumprimento das metas da empresa depende da minimização tanto do tempo de retorno do sistema pós-falha, bem como do número de falhas provocadas por erro humano deste profissional. Neste contexto, um sistema especialista que fornecesse suporte à decisão do operador, durante o restabelecimento do sistema pós-falha, seria de grande importância.

4 SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE CAUSAS DE DESLIGAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE ENERGIA

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se uma proposta de um sistema especialista para diagnóstico de causas de desligamentos, de uma subestação de energia, a partir de uma lista de eventos ordenados cronologicamente. Utilizar-se-á, para desenvolver este SE, o conjunto de regras estruturado numa hierarquia de árvore de falhas, conforme apresentado no capítulo 2. Como estudo de um caso, o SE proposto, será implementado para o diagnóstico de falha de um sistema de alimentação elétrica de uma da subestação CENTRO de 50MVA, alimentada em 69KV, da CEMAR. Uma descrição sucinta do sistema elétrico é apresentada, mostrando-se os passos seguidos no desenvolvimento desta aplicação.

4.2 Descrição do Sistema Especialista

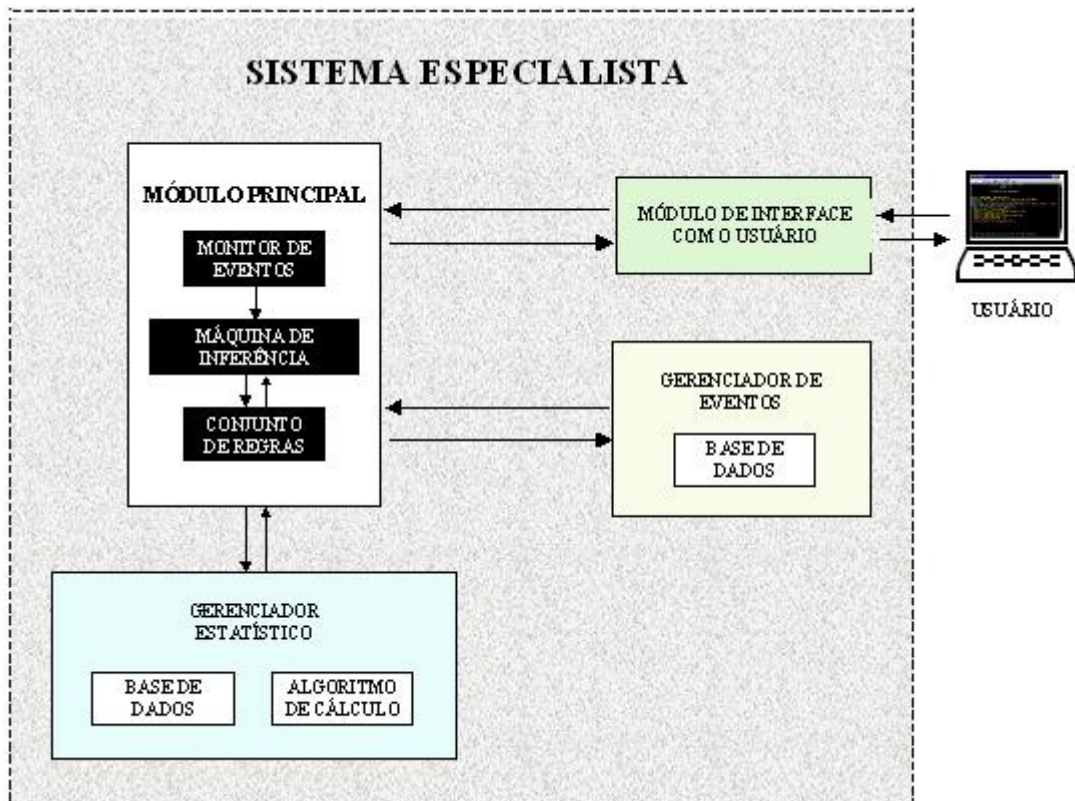
A arquitetura proposta para o SE, conforme apresentado na Fig. 4.1, é constituída dos seguintes módulos: unidade central, denominada Módulo Principal, *Interface* com o Usuário, Gerenciador de Eventos e Gerenciador Estatístico.

A *Interface* com o usuário é o módulo responsável pela entrada de dados fornecidos pelo usuário, e pela saída dos diagnósticos de causas de falhas, ou das análises estatísticas destas causas.

O Gerenciador de Eventos é o módulo responsável pela filtragem dos eventos recebidos, ordenando cronologicamente os eventos relacionados com a ocorrência, e descartando os eventos restantes. Este módulo gera um arquivo contendo uma lista de dados cronologicamente estruturados de eventos de uma mesma ocorrência.

O Gerenciador Estatístico é o módulo que atualiza, a partir dos eventos registrados pelo Gerenciador de Eventos, a taxa de falha dos eventos básicos, mantendo um banco de taxas de falhas de eventos básicos sempre atualizado, permitindo que o Módulo Principal realize análises estatísticas de confiabilidade em qualquer ramo da árvore de falhas. Estes ramos são formatados como conjuntos de regras.

Figura 4.1 - Arquitetura do sistema especialista proposto



O sistema especialista proposto responde a eventos preestabelecidos, supervisionados pelo Gerenciador de Eventos, podendo estes eventos serem o evento-topo da árvore de falhas, outro evento de interesse, ou mais de um evento. Por exemplo, o evento poderia ser a abertura por proteção de um dado elemento de seccionamento de um ramal de interesse. Poderia ser também a condição de um equipamento de potência operando fora de seus valores nominais, condição esta supervisionada por um dado elemento de proteção, tal como um relé. O sistema especialista responderia, então, a este evento preestabelecido, identificando a causa-raiz da falha, ou seja, o evento básico responsável pela falha.

Gerenciador de Eventos

Neste trabalho, propõe-se uma estrutura de programa, responsável pela filtragem dos eventos recebidos, denominada Gerenciador de Eventos, que pode fazer parte do código do sistema especialista, ou ser desenvolvido em um módulo separado, como é aqui o caso. Este gerenciador possui em sua base de dados a lista de eventos preestabelecidos.

Para o correto funcionamento do Gerenciador, ele necessita de uma lista de eventos, para verificar continuamente se algum evento ocorrido consta em sua lista de eventos preestabelecidos. Esta lista de eventos deve possuir algum dado complementar que permita ao

gerenciador definir a ordem de atuação, possibilitando que o sistema diferencie os eventos de causa, dos de consequência. Este dado complementar pode ser o horário do evento ou qualquer outra ordenação seqüencial de eventos. Este registro, para o Gerenciador de Eventos, pode ser automático, através, por exemplo, de um sistema supervisorio, um CLP (Controlador Lógico Programável) ou painel sinótico, ou pode ser manual, através da entrada da lista de eventos via módulo de *Interface* com o usuário.

Após detectado um evento preestabelecido, o gerenciador seleciona os eventos anteriores que podem fazer parte desta ocorrência, e gera uma lista seqüencial de atuação desta ocorrência. O ordenamento seqüencial feito pelo gerenciador é fundamental, visto que, normalmente, os registros não dependem apenas da ordem cronológica de atuação, mas também de outros fatores, tais como: a velocidade de aquisição dos dados pelo sistema, a hierarquia de leitura de dados fornecidos pelas unidades remotas, bem como seu modo de processamento, que pode ser centralizado (neste caso, o evento é registrado diretamente pelo sistema supervisorio), ou distribuído (neste caso, o evento pode sofrer pré-processamento pelas unidades remotas).

A vantagem de se desenvolver o Gerenciador de Eventos como um módulo de programa separado é a possibilidade de *interface* com os vários dispositivos de registro de eventos disponíveis comercialmente, que possuem padrões específicos para cada fabricante. A adequação do gerenciador ao sistema de registro se restringe à formatação do arquivo de registro ao algoritmo de leitura de eventos do gerenciador.

Portanto, este módulo gera um arquivo contendo a lista de dados cronologicamente estruturados de eventos de uma mesma ocorrência, que ativa o Monitor de Eventos do Módulo Principal, inicializando o algoritmo de inferência do sistema especialista.

Módulo Principal

O Módulo Principal é composto do Monitor de Eventos, do Conjunto de Regras, e da Máquina de Inferência.

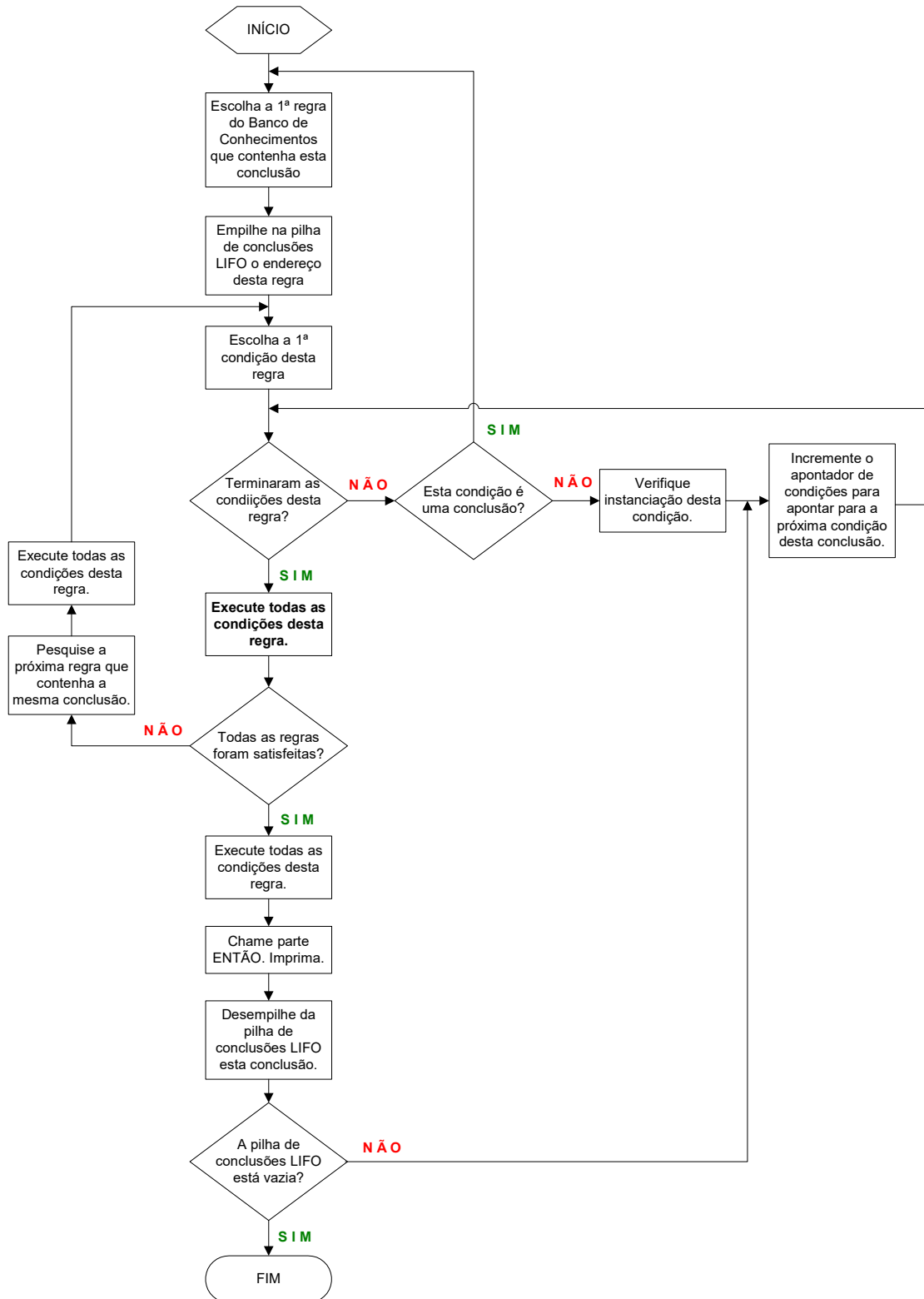
O Monitor de Eventos supervisiona o arquivo que contém a lista de dados gerada pelo Gerenciador de Eventos, ativando a máquina de inferência toda vez que este arquivo é modificado.

O Conjunto de Regras, baseado na estrutura hierárquica de árvore de falhas, conforme explicado nos Capítulos 2 e 3, determina a aplicabilidade de cada regra, e descreve a ação a ser realizada caso a condição da regra seja satisfeita.

O algoritmo da máquina de inferência possui estratégias que definem, por exemplo, a ordem de aplicação de cada regra, as formas de resolução de conflitos e quando aplicar o prognóstico estatístico. Este algoritmo, mostrado na Fig. 4.2, é bastante simples, e funciona conforme os seguintes procedimentos:

1. Após ser ativada pelo Monitor de Eventos, a máquina de inferência verifica no arquivo criado pelo Gerenciador de Eventos, qual foi o evento preestabelecido, identificando-o como a conclusão inicial.
2. Verifica, no seu conjunto de regras, qual a primeira regra que contém a conclusão inicial em sua conclusão.
3. Para cada condição desta regra, verifica se a condição corresponde a um evento básico. Se for, checa no arquivo criado pelo Gerenciador de Eventos se a instância desta condição é verdadeira, isto é, se houve registro de atuação deste evento. Caso a condição não seja um evento básico, verifica seqüencialmente outras regras de forma a se obter a instância desta condição. Quando as instâncias de todas as condições desta regra já tiverem sido obtidas, a Máquina de Inferência verifica se a regra é verdadeira ou não. Se for, o caminho percorrido leva à causa-raiz; caso contrário, outra regra com a mesma conclusão inicial é escolhida, e todo o processo é repetido.
4. Durante o processo, o Gerenciador Estatístico atualiza a taxa de falha de cada evento básico registrado, que levou ao evento-topo (conclusão inicial).
5. Se todas as regras forem percorridas e nenhuma for verdadeira, a máquina de inferência percorre novamente as regras, verificando qual possui a maior probabilidade de falha, encontrando assim a causa que estatisticamente possui a maior probabilidade de ser a causa-raiz.

Figura 4.2 - Algoritmo da Máquina de Inferência do Módulo Principal



Gerenciador Estatístico

O Gerenciador Estatístico é o módulo que administra os eventos básicos da árvore de falhas, recalculando as taxas de falha destes eventos básicos, cada vez que eles ocorrem. A lista de eventos básicos, com suas taxas de falhas, compõem a base de dados do Gerenciador Estatístico.

Sempre que o Módulo Principal detecta que um dado evento registrado é um evento básico, ele o envia para o Gerenciador Estatístico, que executa um algoritmo de cálculo para atualizar a nova taxa de falha deste evento básico. Quando o Módulo Principal não possui eventos suficientes para gerar um diagnóstico, o mesmo solicita ao Gerenciador Estatístico as taxas de falha dos eventos básicos prováveis de terem ocorridos, utilizando-as para gerar um prognóstico estatístico. O Módulo Principal pode também utilizar as taxas de falhas de um dado ramo da árvore de falhas para gerar outros cálculos estatísticos solicitados, como, por exemplo, a disponibilidade operacional deste ramo.

O fato de o gerenciador estatístico administrar apenas os eventos básicos traz grande versatilidade ao sistema especialista, visto que podem-se fazer modificações em qualquer módulo do sistema, ou até mesmo na estrutura da árvore de falhas, sem a necessidade de atualização dos dados estatísticos.

Interface com o Usuário

A *Interface com o Usuário* é o módulo responsável pela entrada e saída de dados entre o usuário e o sistema especialista, podendo ser utilizado tanto para consultas de diagnósticos e de dados estatísticos da árvore de falhas, como para realizar alterações de parâmetros do conjunto de regras e/ou de valores estatísticos de eventos básicos. Este módulo pode ser desenvolvido como parte do código de programa do sistema especialista, ou como um módulo separado, visto que o acesso do usuário ao SE é feito através de consultas e alterações nas bases de dados.

O ELIPE SOFTWARE possui uma extensa biblioteca de índices, símbolos e terminologias amplamente utilizados no setor elétrico brasileiro, facilitando a montagens de telas amigáveis aos Operadores do Sistema Elétrico, como Diagramas Unifilares.

4.3 Aplicação do Sistema Especialista - Estudo de um caso

O sistema elétrico escolhido para aplicar e validar o SE proposto neste trabalho foi a subestação CENTRO, localizado em São Luís, Maranhão. Esta subestação, que supre o fornecimento de energia elétrica a mais de 26.000 estabelecimentos, tem grande importância para a população de São Luís, já que ela fornece energia para todo Centro Histórico, Cultural, Comercial e Político da ilha.

O **Centro Histórico de São Luís** compreende uma área de 220 hectares de extensão. Cerca de 2500 imóveis estão tombados pelo patrimônio histórico estadual, e 1000 pelo IPHAN. Parte desse sítio foi declarado Patrimônio Mundial em 1997 pela UNESCO, por seu conjunto arquitetônico colonial português adaptado ao clima do local.

Os prédios arquitetônicos constituem sobrados, casas térreas e solares. Os sobrados possuem até quatro pavimentos, sendo o térreo loja comercial e os outros pisos residências. Os solares, sobrados suntuosos, possuem muitos detalhes refinados, e as casas térreas, por fim, passíveis de várias classificações (por exemplo, morada inteira: porta com duas janelas de cada lado; meia morada: porta lateral e duas janelas). Todo sistema de distribuição de energia do Centro Histórico é subterrâneo, composto por 10 (dez) subestações abaixadoras e seccionadores de 13.8KV/380V (CTAs).

Entre as construções a serem destacadas, encontram-se o *Convento das Mercês*, a *Casa das Tulhas*, as igrejas *do Rosário* e *do Desterro*, a *Casa das Minas*, *das Fontes* e *das Pedras*, o *Teatro Artur Azevedo* e o *Palácio dos Leões* (sede do governo do estado).



Figura 4.3 - Palácio dos Leões, sede do Governo do Maranhão e Arquitetura Colonial Portuguesa e Francesa



Companhia Energética do Maranhão (CEMAR)

A Companhia Energética do Maranhão – CEMAR é responsável pela concessão de distribuição de energia elétrica aos 217 municípios do Estado do Maranhão. Trata-se de uma área extensa, com cerca de 330 mil km², é pouco maior que a Itália (301.401 km² e população de 60 milhões) e pouco menor que a Alemanha (357.021 km² e população de 83 milhões). Estado do Maranhão é de 6.118.995 habitantes, sendo que 1.211.270 habitantes, que corresponde a 19,8%, estão concentrados na Ilha de São Luís (municípios de São Luís, São José de Ribamar, Raposa e Paço do Lumiar).

Figura 4.4 – Dimensões do Maranhão



O sistema elétrico da CEMAR é composto por 10 regionais elétricos, com 101 subestações interligadas por 6.397 km de linhas de subtransmissão nas tensões de 138 kV, 69 kV e 34,5kV, das quais 30 estão automatizadas, com extensas linhas de distribuição radiais e baixa densidade de carga e de clientes. A rede de Média Tensão, 13,8 kV, é constituída por 314 alimentadores que totalizam 58.517km de extensão. É caracterizada por extensas linhas de distribuição radiais, com baixa densidade de carga e de clientes, e cuja extensão média por

alimentador é de 176 km, incluindo tronco e ramais. A rede de Baixa Tensão opera na tensão de 380/220 V para os circuitos trifásicos urbanos e rurais, e na tensão de 220 V nos circuitos monofásicos rurais. Conta com um parque de 65.832 transformadores de distribuição, incluído também os particulares.

Considerando as grandes extensões e as baixas densidades de carga, a operação e manutenção do sistema representam um desafio singular. Para dar suporte à operação e manutenção de seu sistema elétrico, a CEMAR conta com uma estrutura distribuída estrategicamente em bases operacionais. O raio de atuação das equipes varia de aproximadamente 40 km para as equipes localizadas na Ilha de São Luís, a até 700 km para as equipes que atuam na região sul, marcada pela baixíssima densidade de carga. Tal estrutura vem sofrendo ajustes significativos em função da rápida expansão das redes rurais ocasionada pelo avanço do programa governamental de combate a exclusão de energia elétrica, Luz para Todos.

A CEMAR, a partir de 2005, passou a ter a melhoria dos seus indicadores de qualidade como uma das metas prioritárias da companhia, estabelecendo uma estratégia de melhoria consistente, permitindo que cada conquista alcançada fosse a um só tempo permanente e alavancada para os próximos passos. Foi assim que, em primeiro lugar o foco das ações esteve concentrado na melhoria de indicadores, no atual ciclo tarifário, e na criação de uma infraestrutura sólida de subtransmissão.

Dentro da linha de ação traçada a CEMAR, desde 2005, acrescentou **1.603 km** de linhas de subtransmissão a partir da construção de **31 LTs**. Isto representa um acréscimo de **33%** em relação aos ativos existentes em 2004. Com relação à capacidade de transformação, entre 2005 e 2008 foram acrescentados ao sistema **584 MVA** com a construção de **17** subestações e ampliação de outras **47**. Isto representa um acréscimo de **61%** na capacidade instalada em relação aos ativos existentes em 2004.

O reflexo desse esforço de melhoria da subtransmissão foi uma redução significativa nos indicadores de continuidade no mesmo período, chegando a mais de **57%** de redução tanto no DEC como no FEC.

Sistema de aquisição de dados das Subestações Automatizadas

O sistema supervisorio empregado na aquisição de dados de eventos pelo gerenciador de eventos do SE utiliza a aplicação SCADA (Supervisory Control And Data

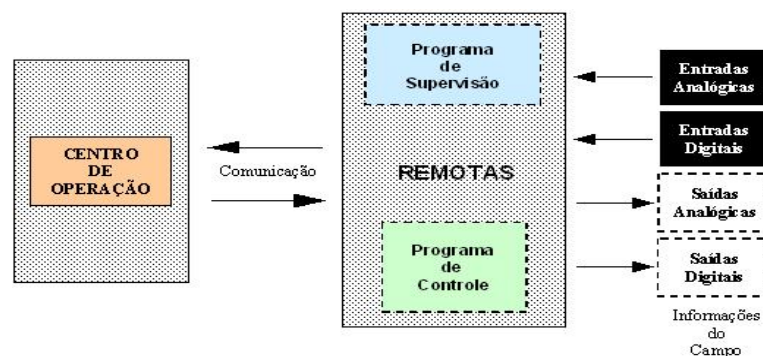
Acquisition) 0 comercial da ELIPSE, denominada ELIPSE SCADA 0. Sua plataforma é o sistema operacional Windows XP. Este sistema supervisorio é utilizado, entre outras funções, na aquisição de dados como: valores de tensões e correntes alternadas, *status* dos relés de proteção, seccionadoras, disjuntores e religadores, valores de correntes e tensões contínuas totais das salas de baterias e por retificador. Sua arquitetura baseia-se na utilização de unidades remotas instaladas nas salas de controle das subestações, que adquirem, digitalizam e transmitem os dados coletados no campo para o centro de operação do sistema, conforme Fig. 4.4.

As unidades remotas são equipamentos microprocessados e modulares, que servem de *interface* entre o sistema de supervisão e o processo elétrico, coletando, em tempo real, dados analógicos ou digitais (resolução de 2 ms), que são enviados ao centro de operação do sistema, via fibra ótica, via satélite ou GPRS (General Packet Radio Service: é um serviço de valor agregado não baseado em voz que permite o envio e recepção de informações através de uma rede telefônica móvel).

As grandezas digitais são lidas diretamente pela unidade remota. Os eventos digitais são obtidos através de contatos secos de relés, e são os *status* supervisionados dos relés de proteção ou da operação das bobinas de relés de bloqueio. As entradas digitais recebem sinais do tipo *status* ligado ou desligado, aberto ou fechado e alarmado ou normalizado, dos diversos equipamentos da subestação. Já as entradas analógicas recebem sinais do tipo valores de tensão, corrente, potência e pressão. Na CEMAR, o sistema supervisorio é utilizado tanto para monitoração quanto para de controle, entretanto, como falamos anteriormente, o SE especialista deve servir apenas como suporte a decisão do especialista humano, ficando então a função controle das UTRs sem utilização nesse projeto.

As remotas possuem módulos de memória que possibilitam a manutenção de dados, mesmo que haja a perda de comunicação entre a remota e o centro de operação.

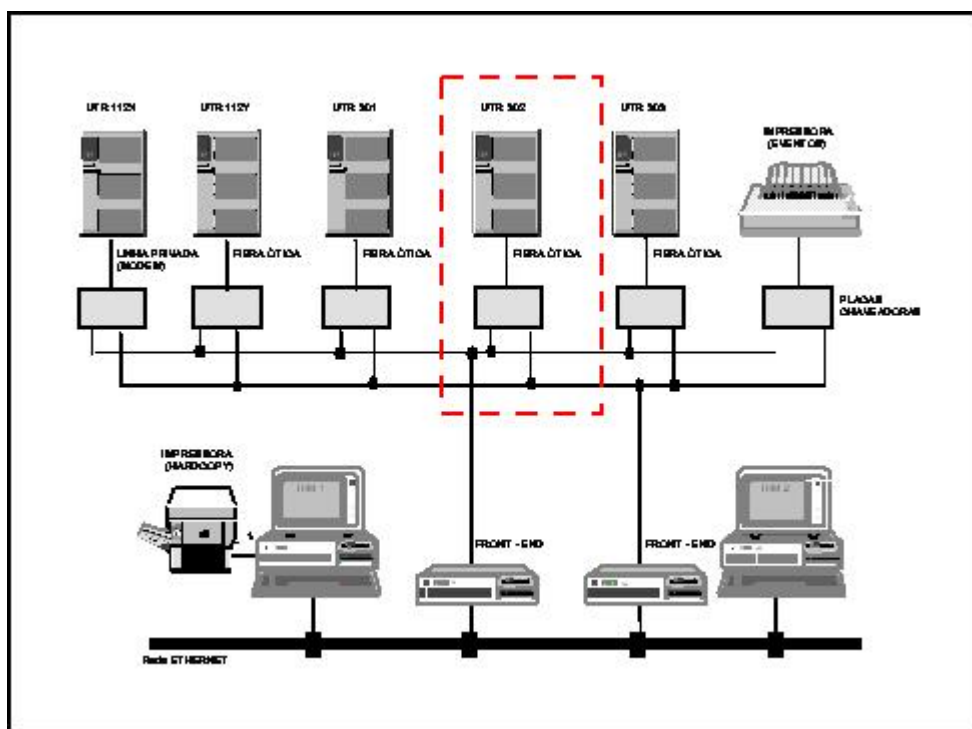
Figura 4.5 – Diagrama ilustrativo do Sistema Supervisorio CEMAR



O centro de operação trabalha em modo *dual-hot-stand-by*. Neste caso, há um microcomputador configurado como mestre, que recebe todos os dados das unidades remotas, e atualiza continuamente o microcomputador configurado como reserva. O sistema supervisório possui um programa de monitoramento permanente contra falhas (*watchdog*), que verifica se os dois microcomputadores estão em perfeito funcionamento. Caso o mestre apresente problemas ou pare de funcionar, o reserva assume imediatamente.

A rede *ethernet* é o meio principal utilizado no sistema de automação da CEMAR, necessário para a implantação da configuração *dual-hot-stand-by*, tornando possível a disponibilidade da base de dados, ficando o sistema GPRS como *stand-by*. O chaveamento de uma máquina para outra é feito via placas eletrônicas. A configuração do sistema supervisório CEMAR é vista na Fig. 4.5, onde o bloco tracejado em vermelho mostra a parte desse sistema responsável pela aquisição de dados a serem utilizados na aplicação do SE.

Figura 4.6 - Ligação do sistema supervisório da aplicação



Adoção de premissas na elaboração da árvore de falhas

Como foi visto na seção 2.5, uma das etapas preliminares para construção da árvore de falhas é o estabelecimento de considerações e premissas sobre o comportamento do sistema elétrico. Isto se faz necessário devido à complexidade do sistema, de forma a limitar a

sua abrangência no foco desejado, tornando factíveis e válidos sua lógica e dados necessários posteriormente nas análises.

Assim, na construção da árvore de falhas utilizada na modelagem do banco de conhecimentos do SE proposto, foram adotadas diversas considerações e premissas, visando limitar seu foco nos objetivos estabelecidos, tornando o SE eficiente (abrangente na área de interesse), mas compacto (sem regras desnecessárias). Como exemplo de premissas e considerações adotadas, podem-se citar:

- Não estão sendo considerados os erros humanos;
- Eventos Intencionais, não caracterizam falhas, portanto não serão desenvolvidos nas árvores de falhas.
- Como os relés digitais desempenham mais de uma função de proteção, considerou-se que cada função de proteção é executada independentemente, isto é, a falha de uma função não acarreta na falha de qualquer outra;
- Caso o sistema não seja capaz de informar a causa raiz, ele deve informar as prováveis causas com a probabilidade associada.
- Falhas nos relés digitais serão tratados como um dos ramos das árvores, com probabilidade característica do setor.

Como a construção da árvore de falhas não é o objetivo central deste trabalho, considerou-se desnecessário e dispendioso apresentar a lista completa de todas as premissas e considerações adotadas na construção da referida árvore.

Elaboração da árvore de falhas

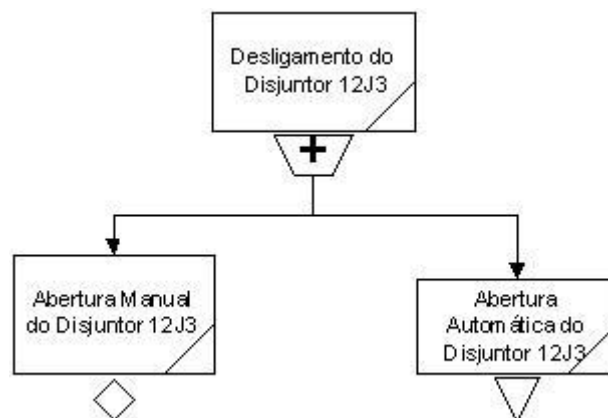
Para a representação desta árvore de falhas, adotou-se a seguinte simbologia:

- i. O retângulo significa um evento de interesse, hierarquizado de cima para baixo. O texto no seu interior discrimina este evento. Há 3 tipos diferentes de eventos:
 - Quando há um triângulo abaixo do retângulo significa que este evento gera um ramo, que será detalhado em outro local (transferência);

- Quando há um losango abaixo do retângulo, significa que este evento não será desenvolvido;
 - Quando há um círculo abaixo do retângulo, significa que este evento é básico.
- ii. O símbolo identificado com + significa um conector lógico OU, sinalizando que a ocorrência de qualquer evento abaixo e diretamente conectado nele, acarreta na ocorrência do evento acima do conector.

Para este estudo, considerou-se como evento-topo o desligamento do disjuntor 12J3 da Subestação CENTRO. Este evento-topo tem 2 eventos-prioritários: *Abertura manual do disjuntor 12J3* e *abertura automática do disjuntor 12J3* (ver Fig. 4.7).

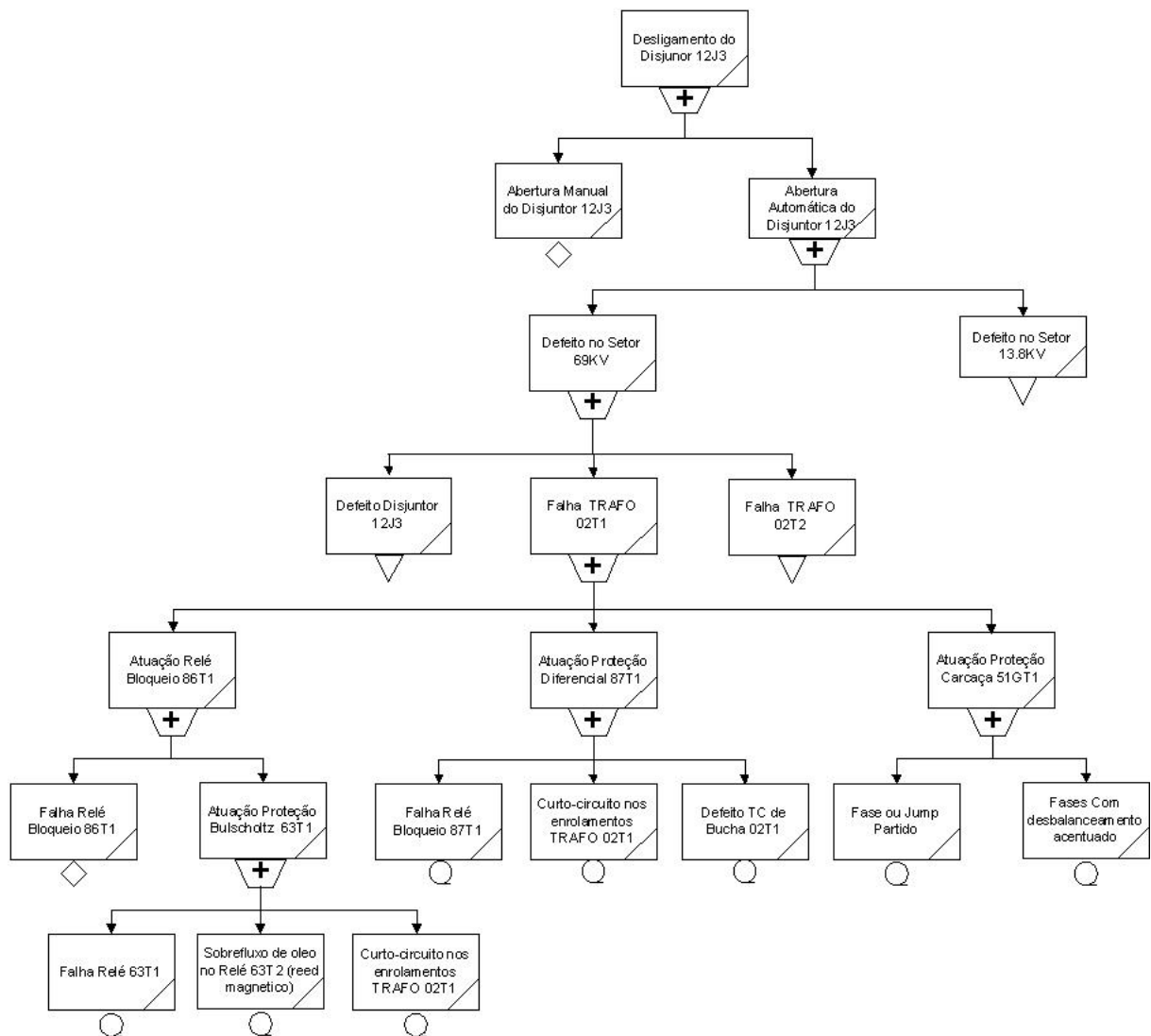
Figura 4.7 - Primeiro ramo da árvore de falhas



A diferenciação de qual evento-prioritário levou ao evento-topo é feita via supervisão do *status* de contatos de relés auxiliares, feita pelo sistema supervisor. O evento *abertura manual do disjuntor 12J3* é, na realidade, um evento não desenvolvido, visto que não há interesse em se aprofundar num evento intencional, que para nossas premissas não caracteriza falha.

Portanto, apenas o evento *abertura automática do disjuntor 12J3* criará ramificações, via novos eventos prioritários, que serão: *Defeito disjuntor 12J3*; *Proteção Intrínseca Trafos 02T1*; *Proteção Intrínsecas Trafos 02T1*; *Proteção Sobrecorrente (51) Trafo 02T1*; *Proteção Sobrecorrente (51) e Trafo 02T2* (ver Fig. 4.7). Este processo de ramificação continua até que todas as terminações de todos os ramos sejam eventos básicos ou eventos não desenvolvidos. Não será mostrada a árvore de falhas completa, visto que isto exigiria um número muito grande de páginas, e não é o objetivo principal deste trabalho.

Figura 4.8 - Ramos da árvore de falhas



4.4 Considerações finais

Neste capítulo, mostrou-se como foi feita a adequação do SE proposto à aplicação, salientando a necessidade de definição prévia das premissas de estudo, e a forma de elaboração da árvore de falhas propriamente dita.

É importante enfatizar que esta proposta de adequação do sistema especialista, apresentada aqui, não é a única forma possível, uma vez que certo nível de subjetividade é inevitável. Entretanto, esta solução foi implementada e gera bons resultados, conforme será visto no próximo capítulo.

5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA ESPECIALISTA ATRAVÉS DE TESTES E SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS

5.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo analisar o desempenho do SE proposto em alguns casos de falhas possíveis em equipamentos da subestação CENTRO. Em cada caso, o desempenho do SE é comparado com o desempenho alcançado ou esperado de um especialista humano. Uma análise conclusiva da potencialidade do SE proposto é também apresentada.

5.2 Operação do Sistema Especialista

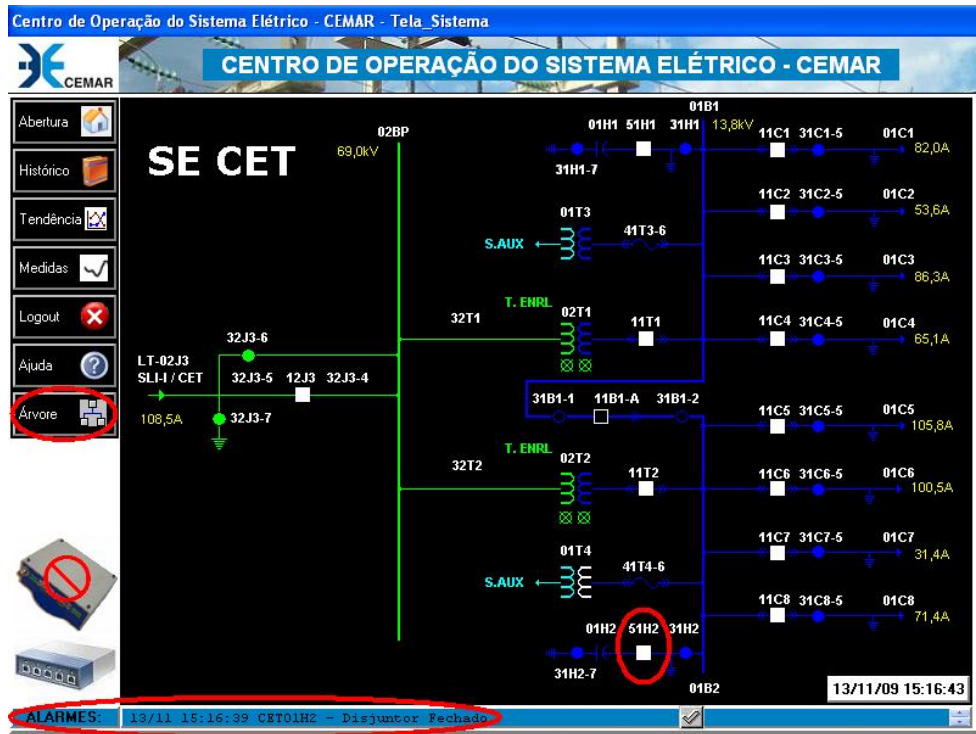
Como já tratado anteriormente, o sistema especialista foi construído na plataforma SCADA ELIPSE. Na figura 5.1 temos a tela principal do sistema disponível ao Especialista Humano.

Observe que a tela é uma representação do Diagrama Unifilar da Subestação CENTRO. Esta é uma forma de facilitar ao Operador do Sistema Elétrico o funcionamento do sistema, e visualizar de forma rápida o equipamento que “operou”, iniciando os procedimentos para a normalização do sistema.

A Operação de procede da seguinte maneira:

1. Passo: Quando um equipamento sai de operação, o mesmo é sinalizado na tela do Sistema Especialista através de um Alarme localizado o canto inferior da tela.
2. Passo: O Operador então pressiona com o mouse no botão para geração da Árvore de Falhas da ocorrência, localizado no lado direito da tela
3. Passo: Após verificar a possível causa raiz, através da análise da árvore de Falhas, o operador fecha a árvore e dá início ao procedimento de normalização do Sistema Elétrico da Subestação.

Figura 5.1 – Visualização da tela principal do SE



5.3 Características dos testes e simulações

Devido à atual configuração do sistema supervisorio da CEMAR, que adquire e mantém os dados utilizados pelo SE proposto, é possível simular uma falha através do módulo I/O service usando protocolo PMP3, apenas com o uso de um *notebook* conectado a UTR, sem que seja necessário provocar uma saída real da subestação, ou seja, foram simuladas várias saídas de equipamentos e atuações de proteções, onde foi analisada a ação do especialista humano e do Sistema Especialista separadamente a fim de verificar o comportamento de cada um deles, em seguida comparado conjuntamente e analisar os resultados.

Para realização destas simulações, optou-se por testar cinco casos de eventos de falhas, com grau crescente de complexidade:

- i) Evento³ programado;
- ii) Falha habitual; (Média Dificuldade para Especialista Humano, mas consta na base de dados do SE)

³ Pelos princípios da Confiabilidade, um evento programado não é tratado como uma falha. Esta hipótese foi considerada para testar o comportamento do SE em eventos não intempestivos.

- iii) Falha não habitual; (Altíssima Dificuldade para Especialista Humano, mas consta na base de dados do SE)
- iv) Falha não habitual; (Alta Dificuldade para Especialista Humano e não consta na base de dados do SE)
- v) Falha não habitual, (Alta Dificuldade para Especialista Humano, mas consta na base de dados do SE)

5.4 Estudo de casos

Para análise dos casos mencionados, considerou-se, para cada caso:

- i) a descrição do evento, levando-se em consideração a nomenclatura técnica usada no ambiente de subestações;
- ii) o nível de dificuldade para o especialista humano;
- iii) a visualização do evento na árvore de falhas;
- iv) a visualização do diagnóstico.

SIMULAÇÃO 1: Programado

- **Ocorrência:** Desligamento Manual do Disjuntor de Barra 11T1 da Subestação CENTRO
- **Descrição da Ocorrência:** O acionamento da BOTÃO DE ABERTURA MECÂNICA do disjuntor 11T1, localizado no próprio equipamento no pátio da Subestação, provoca a sua abertura com a energização das bobina OC (*Opening Coil*) e STC (*Shunt Trip Coil*).
- **Nível de Dificuldade para o Especialista Humano:** Baixo
- **Visualização do Evento na Árvore de Falhas:** Fig. 5.2.
- **Visualização da Falha no SE:** Fig. 5.3.
- **Visualização do Diagnóstico do SE:** Fig. 5.4.
- **Análise de Desempenho do SE:** Esta simulação está contida no banco de conhecimento do Sistema Especialista, conforme pode ser visto na Fig. 5.2. O Sistema Especialista forneceu a solução correta, ou seja: *Abertura Manual do Disjuntor 12J3*. Trata-se de uma ocorrência trivial e habitual, no qual o especialista humano não teria dificuldade em encontrar a causa-raiz.

Figura 5.2- Visualização do evento na árvore de falhas para a 1ª simulação

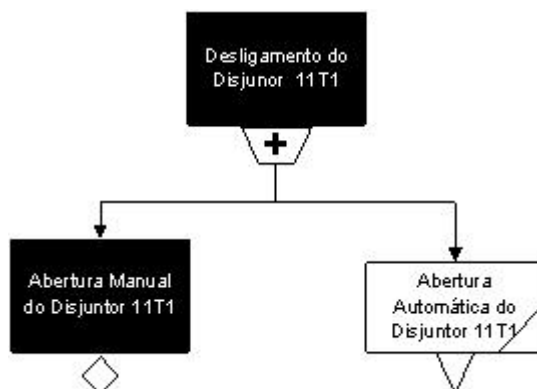


Figura 5.3 - Visualização da falha no SE

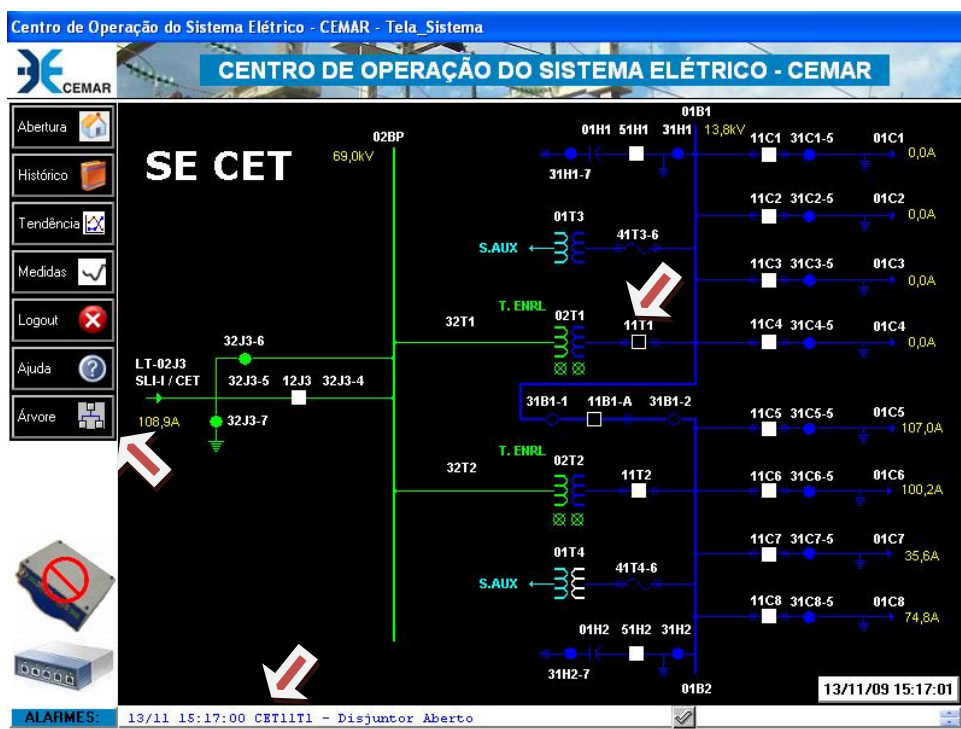
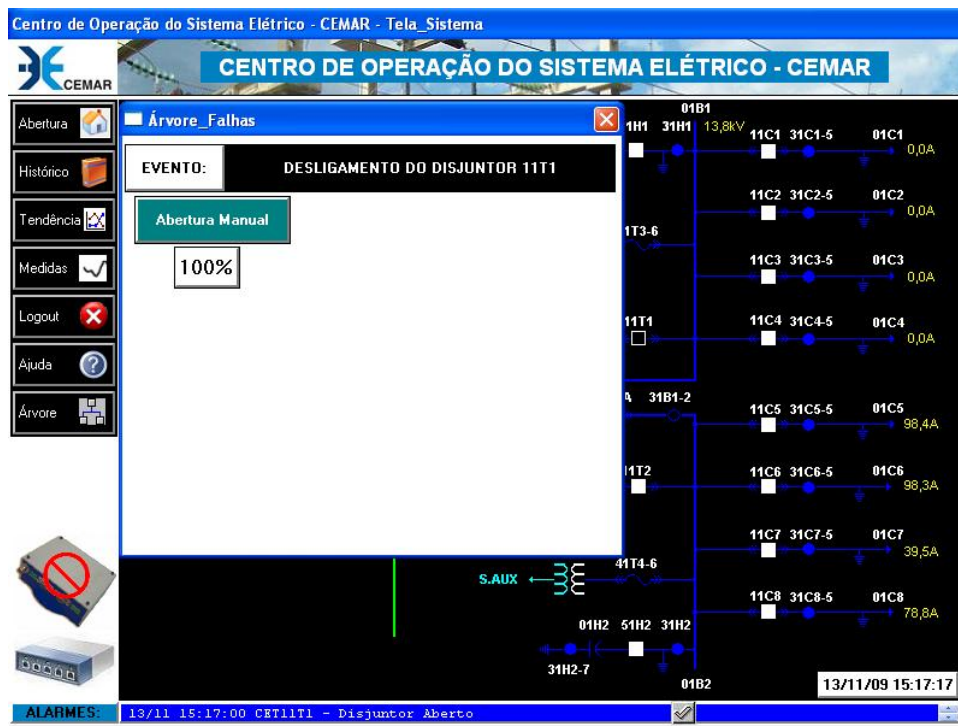


Figura 5.4 - Visualização do Diagnóstico do SE



SIMULAÇÃO 2: Falha Habitual.

- **Ocorrência:** Desligamento Automático do Disjuntor de Barra 11T1 da Subestação CENTRO, devido à atuação do Relé SEL 351 de Barra
- **Descrição da Ocorrência:** Um Curto-Circuito em uma das muflas localizada na Barra 01B1 sensibilizou a proteção 51AN do Relé de Sobrecorrente, sendo enviado sinal de abertura para o disjuntor 11T1.
- **Nível de Dificuldade para o Especialista Humano:** Médio
- **Visualização do Evento na Árvore de Falhas:** Fig. 5.5.
- **Visualização da Falha no SE:** Fig. 5.6.
- **Visualização do Diagnóstico do SE:** Fig. 5.7.
- **Análise de Desempenho do SE:** Esta simulação está contida no banco de conhecimento do Sistema Especialista, conforme pode ser visto na Fig. 5.5. O Sistema Especialista forneceu a solução correta, ou seja: *Curto-Circuito BARRA 01B1*. Trata-se de uma ocorrência trivial e habitual, no qual o especialista humano não teria dificuldade em encontrar a causa-raiz.

Figura 5.5- Visualização do evento na árvore de falhas para a 2ª simulação

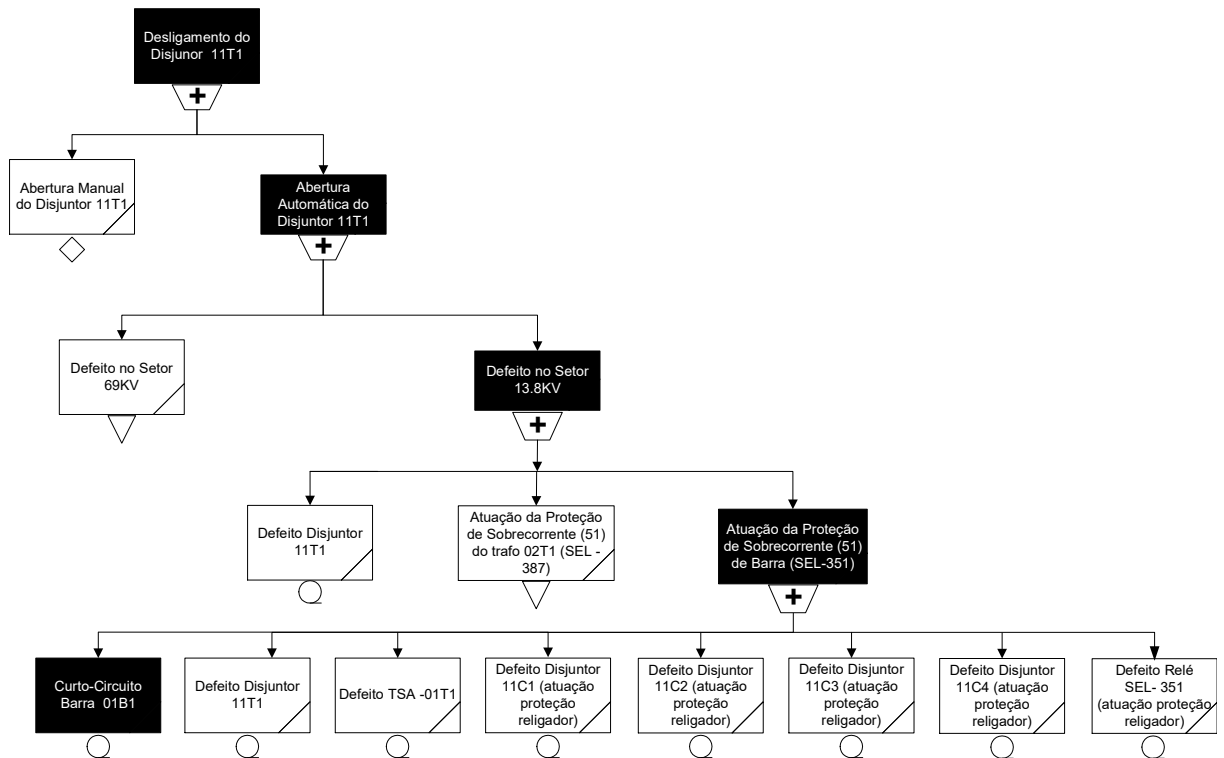


Figura 5.6 - Visualização da falha no SE

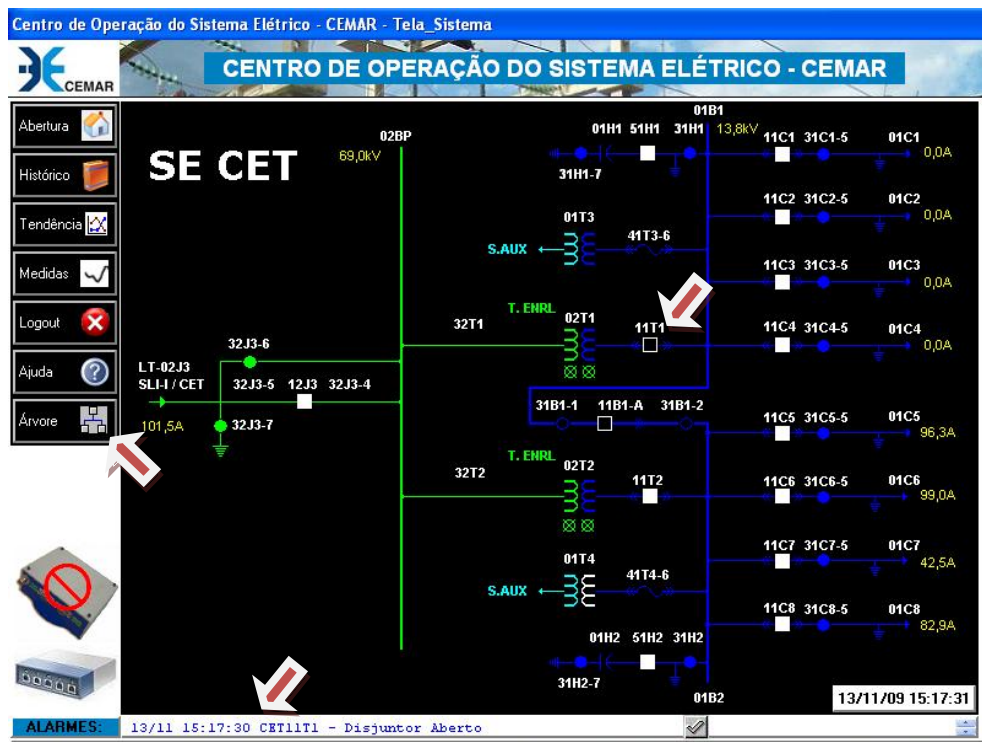
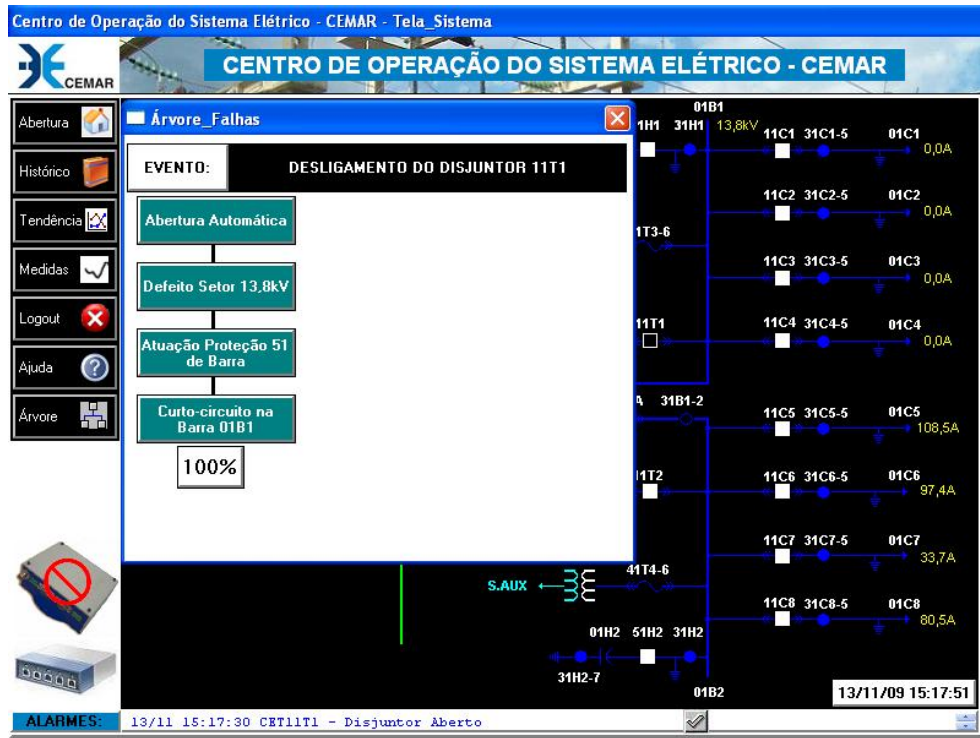


Figura 5.7 - Visualização do Diagnóstico do SE



SIMULAÇÃO 3: Falha Não habitual.

- **Ocorrência:** Desligamento Automático do Disjuntor de Barra 11T1 e do disjuntor Geral da Subestação CENTRO 12J3, devido à atuação do Relé SEL 387 do Transformador.
- **Descrição da Ocorrência:** Um Curto-Circuito no Banco Capacitor 01H2, sensibilizou simultaneamente as proteções do disjuntor 11H1 e a proteção intrínseca do transformador 51G. Como a proteção do Banco capacitor não abriu no tempo predeterminado, a proteção de retaguarda, Relé SEL 387, atuou satisfatoriamente, sendo enviado sinal de abertura para o disjuntor de Barra 11T1 e Disjuntor Geral 12J3.
- **Nível de Dificuldade para o Especialista Humano:** Altíssimo
- **Visualização do Evento na Árvore de Falhas:** Fig. 5.8.
- **Visualização da Falha no SE:** Fig. 5.9.
- **Visualização do Diagnóstico do SE:** Fig. 5.10.
- **Análise de Desempenho do SE:** Esta simulação está contida no banco de conhecimento do Sistema Especialista, conforme pode ser visto na Fig. 5.8. O Sistema Especialista forneceu a solução correta, ou seja: *Defeito Banco Capacitor*

01H2. Trata-se de uma ocorrência não habitual e de difícil compreensão, no qual o especialista humano teria grande dificuldade em encontrar a causa-raiz.

Figura 5.8 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 3ª simulação

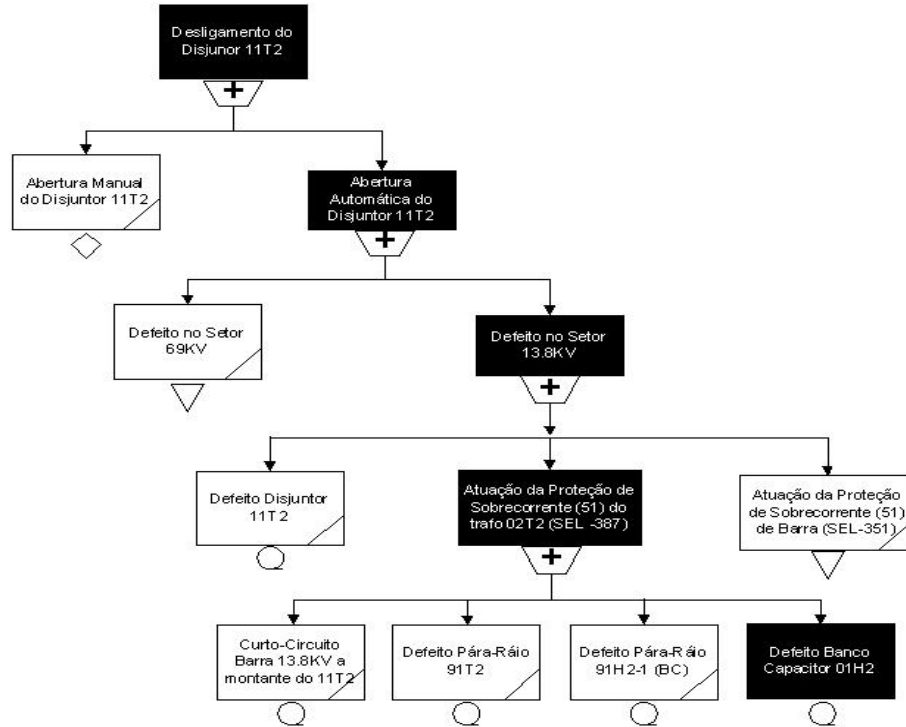


Figura 5.9 - Visualização da falha no SE

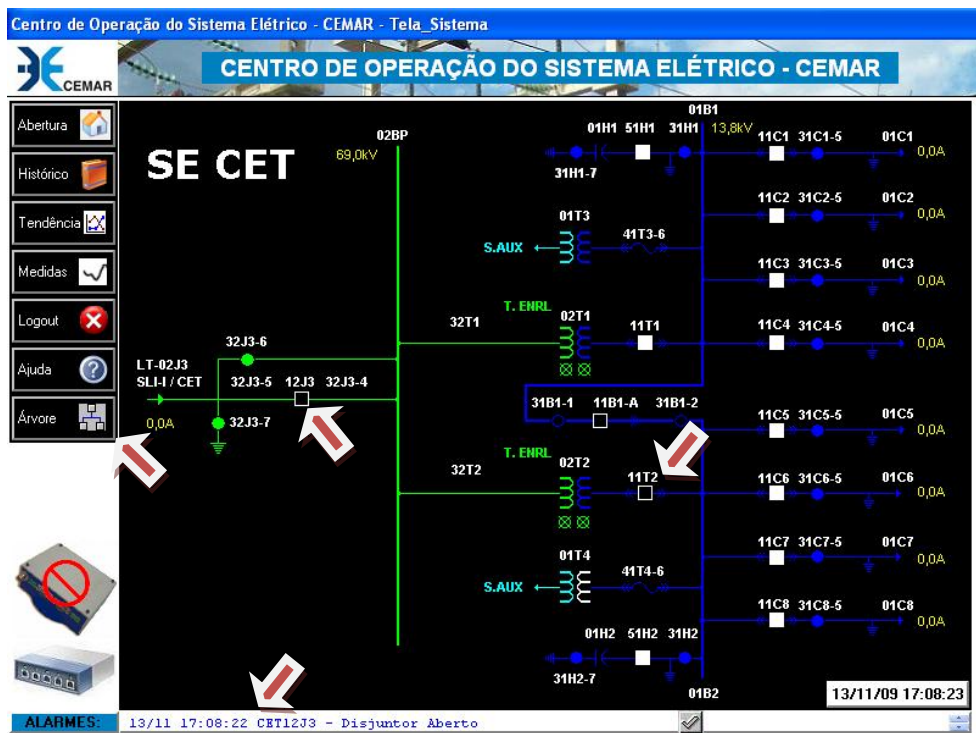
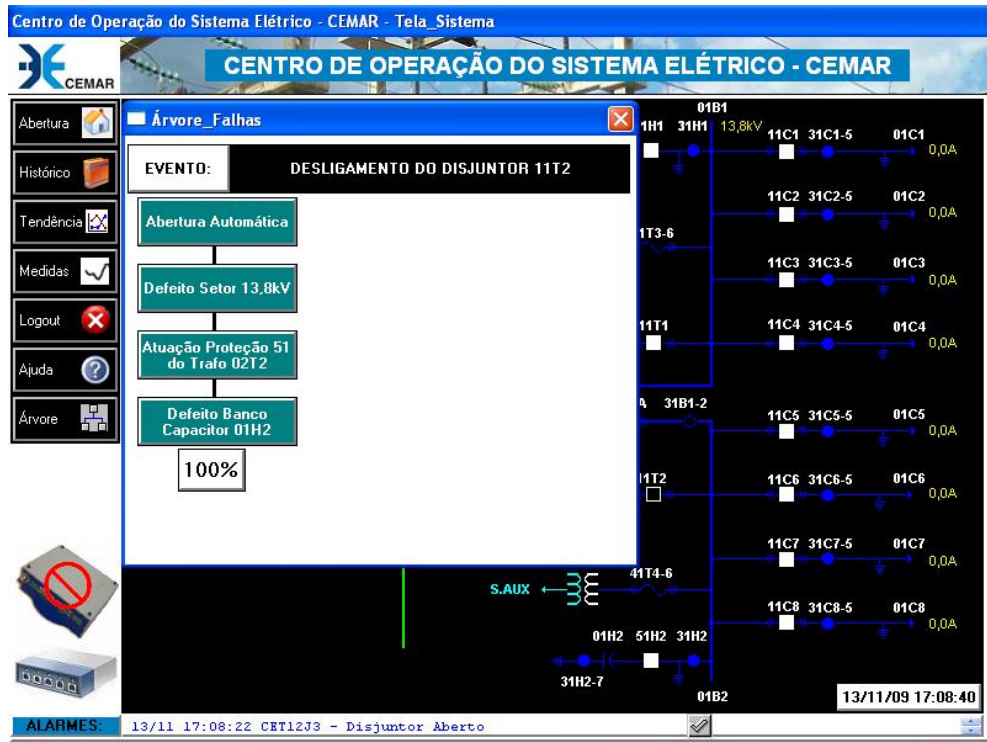


Figura 5.10 - Visualização do Diagnóstico do SE



SIMULAÇÃO 4: Falha Não habitual.

- **Ocorrência:** Desligamento Automático do Disjuntor Geral 12J3 da Subestação CENTRO, devido à atuação do Relé de Diferencial 87T1 do Transformador 02T1.
- **Descrição da Ocorrência:** Uma Falha no Relé 87T1, sensibilizou as proteções, sendo enviado sinal de abertura para o disjuntor de Barra 11T1 e Disjuntor Geral 12J3.
- **Nível de Dificuldade para o Especialista Humano:** Alto
- **Visualização do Evento na Árvore de Falhas:** Fig. 5.11.
- **Visualização da Falha no SE:** Fig. 5.12.
- **Visualização do Diagnóstico do SE:** Fig. 5.13.
- **Análise de Desempenho do SE:** Esta simulação não está contida no banco de conhecimento do Sistema Especialista, conforme pode ser visto na Fig. 5.8. O Sistema Especialista forneceu uma solução estatística, ou seja: *Falha no Relé 87T1*, capaz de auxiliar o Especialista Humano a encontrar a causa raiz em menor tempo.

Figura 5.11 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 4ª simulação

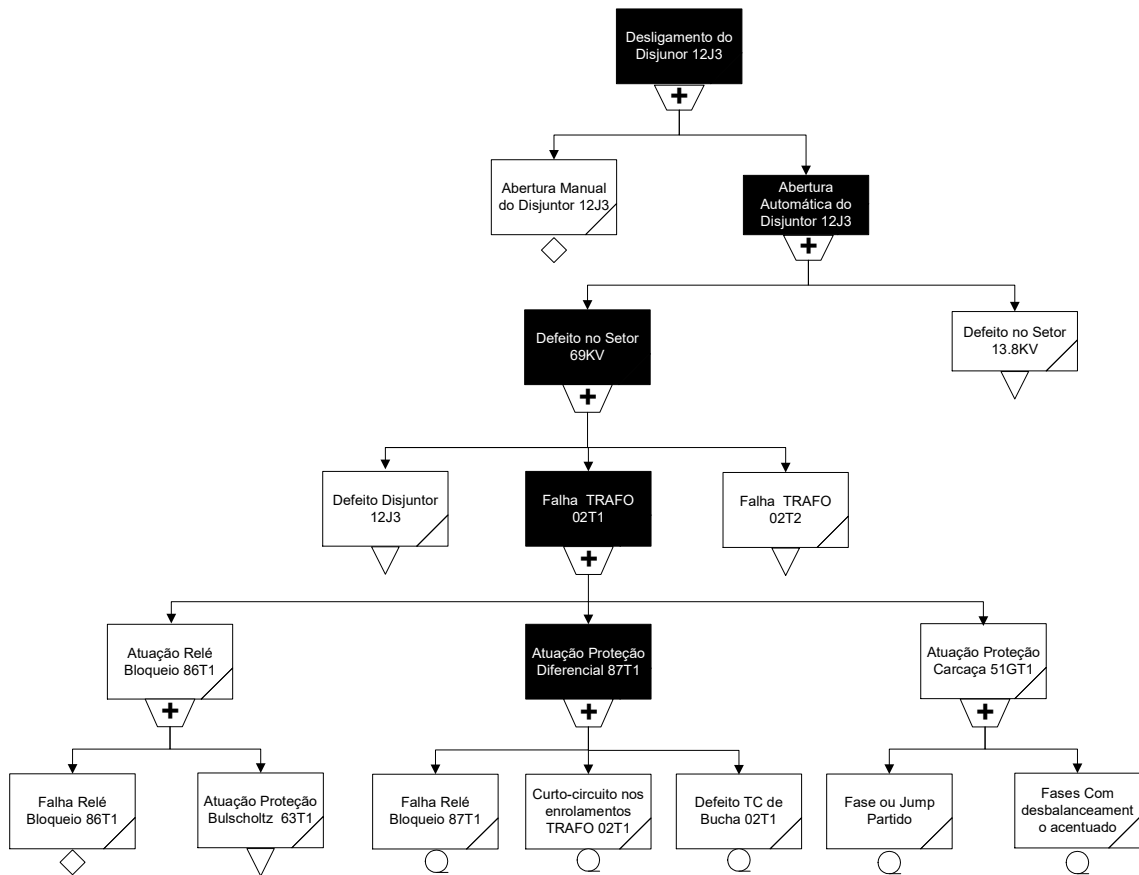


Figura 5.12 - Visualização da falha no SE

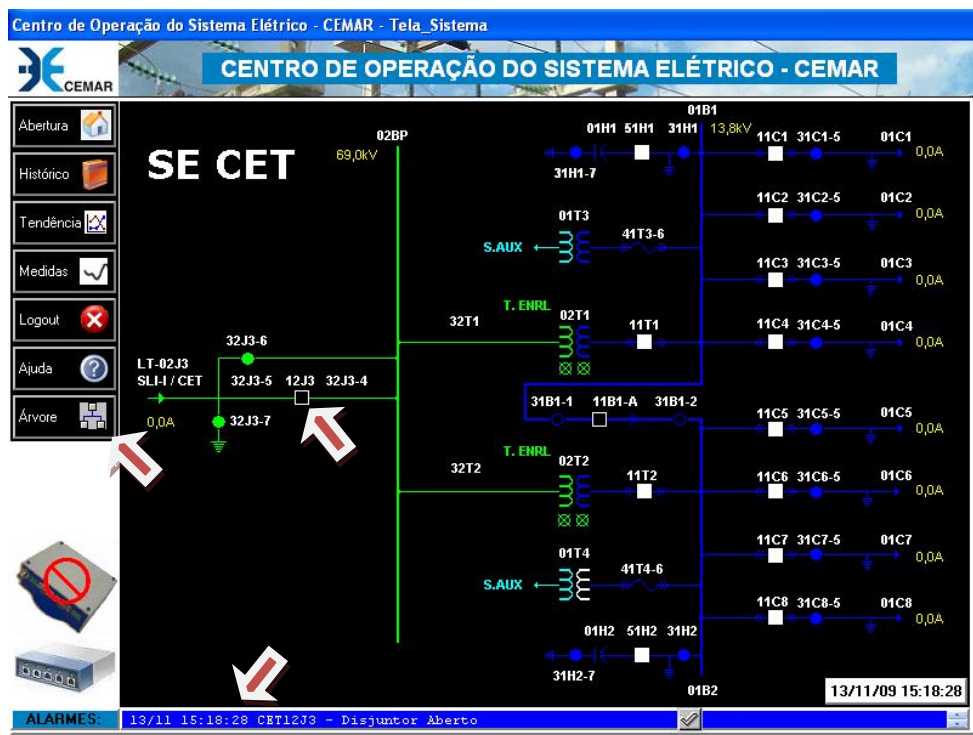
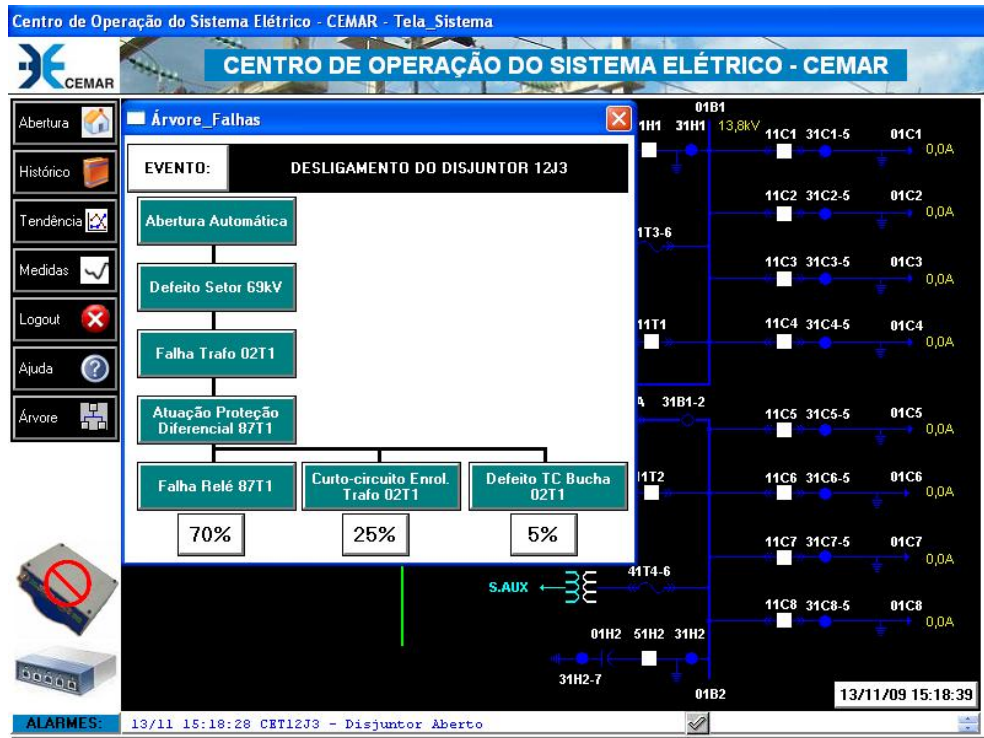


Figura 5.13 - Visualização do Diagnóstico do SE



SIMULAÇÃO 5: Falha Não habitual.

- **Ocorrência:** Desligamento Automático do Disjuntor Geral 11T2 da Subestação CENTRO, devido à atuação do Relé de Bloqueio 86T2 do Transformador 02T2
- **Descrição da Ocorrência:** Uma Atuação indevida do relé de bloqueio enviou sinal de abertura para o disjuntor de Barra 11T2 e Disjuntor Geral 12J3 (que não abriu);
- **Nível de Dificuldade para o Especialista Humano:** Altíssimo
- **Visualização do Evento na Árvore de Falhas:** Fig. 5.14.
- **Visualização da Falha no SE:** Fig. 5.15.
- **Visualização do Diagnóstico do SE:** Fig. 5.16.
- **Análise de Desempenho do SE:** Esta simulação está contida no banco de conhecimento do Sistema Especialista, conforme pode ser visto na Fig. 5.15. O Sistema Especialista forneceu a solução correta, ou seja: *Falha Relé de Bloqueio 86T2*. Trata-se de uma ocorrência não habitual e de difícil compreensão, no qual o especialista humano teria grande dificuldade em encontrar a causa-raiz.

Figura 5.14 - Visualização do evento na árvore de falhas para a 5ª simulação

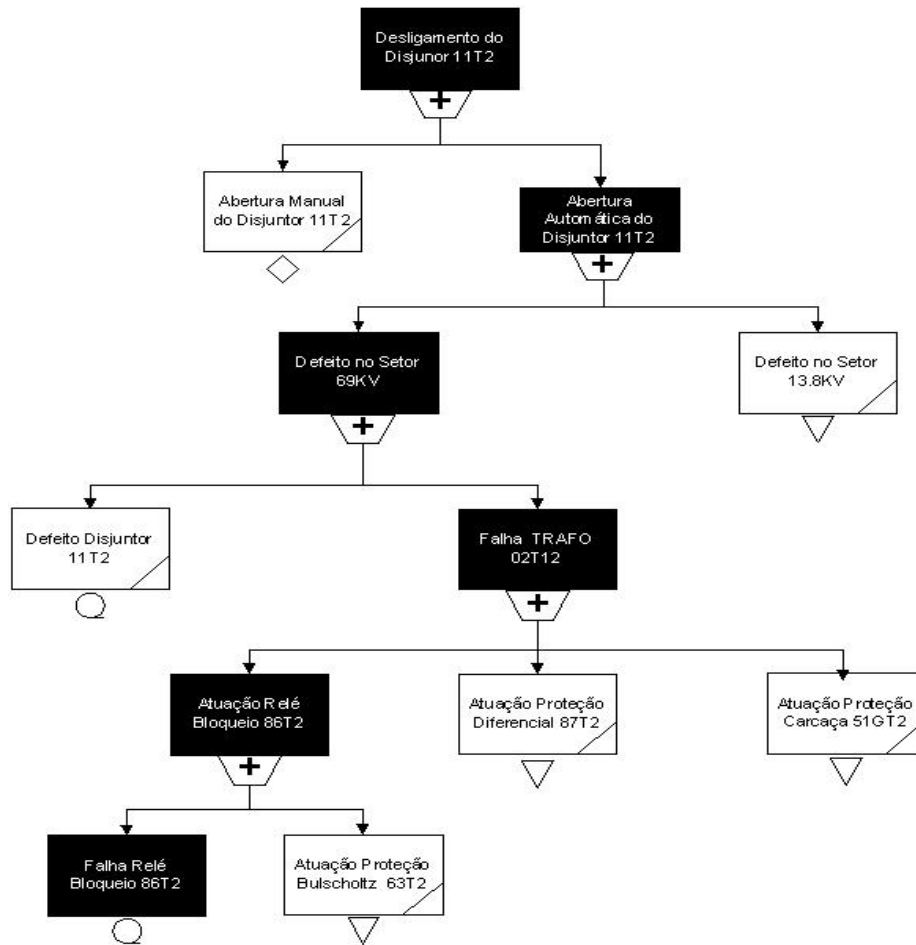


Figura 5.15 - Visualização da falha no SE

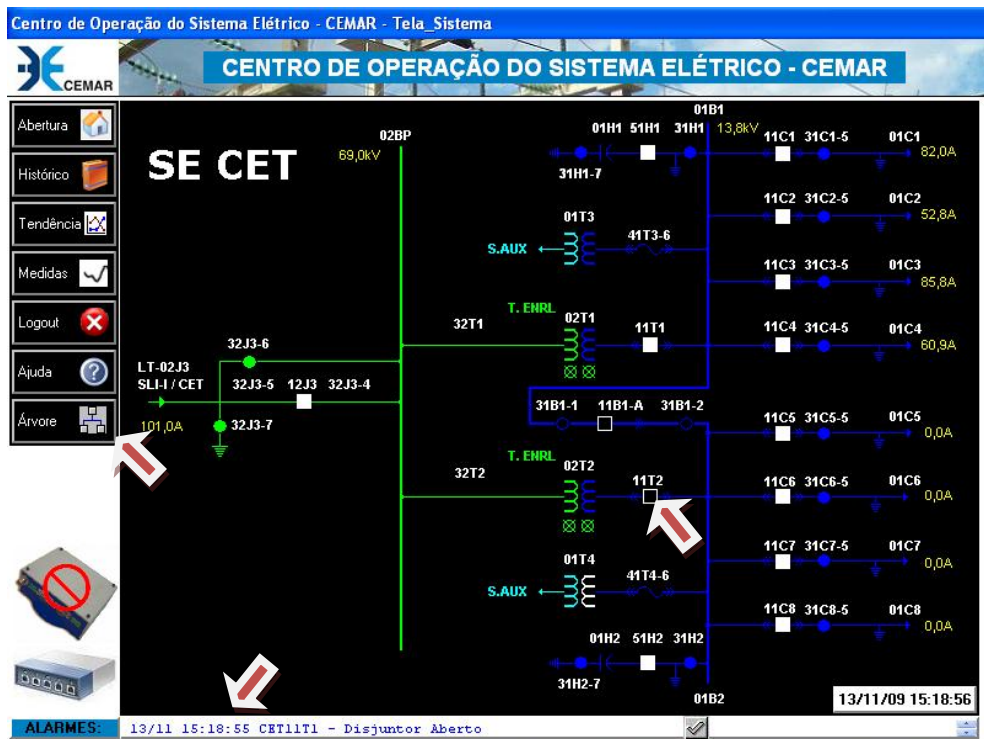
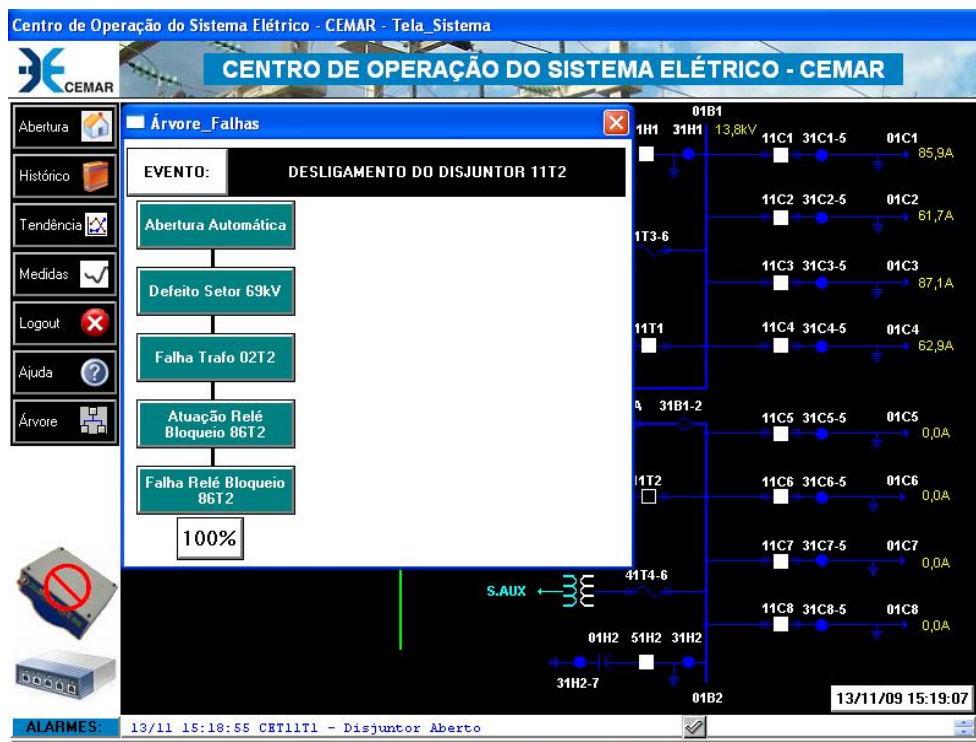


Figura 5.16 - Visualização do Diagnóstico do SE



5.5 Considerações finais

Em todos os testes e simulações, o SE proposto forneceu a solução correta, isto é, a causa-raiz da ocorrência a partir dos eventos de disparos e seqüências de alarmes, demonstrando que o algoritmo desenvolvido atende plenamente a este objetivo.

O desempenho do SE quanto à atualização das taxas de falhas dos eventos básicos pelo Gerenciador Estatístico foi testado apenas parcialmente, visto que o tempo deste teste, de um mês, não foi suficiente para se obter uma quantidade significativa de eventos. O teste resumiu-se à avaliação da lógica de seu algoritmo. Neste sentido, o Gerenciador atendeu à expectativa, como ilustrado no quinto caso, quando da geração de soluções estatísticas.

Em relação ao especialista humano, o SE se mostrou superior em relação à velocidade e uniformidade de análise das ocorrências, fornecendo sempre uma solução estatística, como nos casos apresentados. Para melhorar o grau de certeza das soluções estatísticas fornecidas, há a necessidade de revisão sistemática do banco de conhecimentos, com a finalidade de tratar o maior número possível de casos de falhas.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os testes e simulações realizados demonstraram que o sistema especialista proposto atende plenamente ao seu objetivo, que é o de fornecer diagnóstico de causas-raízes de eventos de sistemas elétricos em subestações, funcionando como uma importante ferramenta de suporte à decisão dos operadores do sistema elétrico da CEMAR.

A incorporação do Gerenciador Estatístico como módulo funcional do SE possibilitou o fornecimento de diagnóstico estatístico de falhas, quando da impossibilidade de diagnóstico a partir dos alarmes recebidos, garantindo que o SE sempre fornecerá uma solução. Diferentemente dos projetos convencionais de SE, onde a abordagem estatística é incorporada nas definições das regras, o Gerenciador proposto foi projetado para gerenciar as taxas de falhas somente dos eventos básicos. Através de um algoritmo interno, o Gerenciador realiza as análises estatísticas sobre a árvore de falhas formatada nas regras, independentemente de qualquer alteração nesta árvore, garantindo a versatilidade necessária para a utilização prática de um SE na configuração dinâmica de uma subestação.

A boa aceitação do SE por parte dos operadores e demais profissionais da subestação demonstram a real aplicabilidade deste sistema para fins operacionais, complementando a função dos técnicos, notadamente em situações de ocorrência de falhas não habituais, acrescidas de problemas nas sinalizações.

Uma deficiência do SE testado é a sua base de conhecimento, que por ter sido criada a partir de uma árvore de falhas para estudos estatísticos, não possui um foco operacional, problema este que pode ser corrigido sem grandes dificuldades.

Como continuidade deste trabalho, pretende-se desenvolver no sistema especialista as seguintes características:

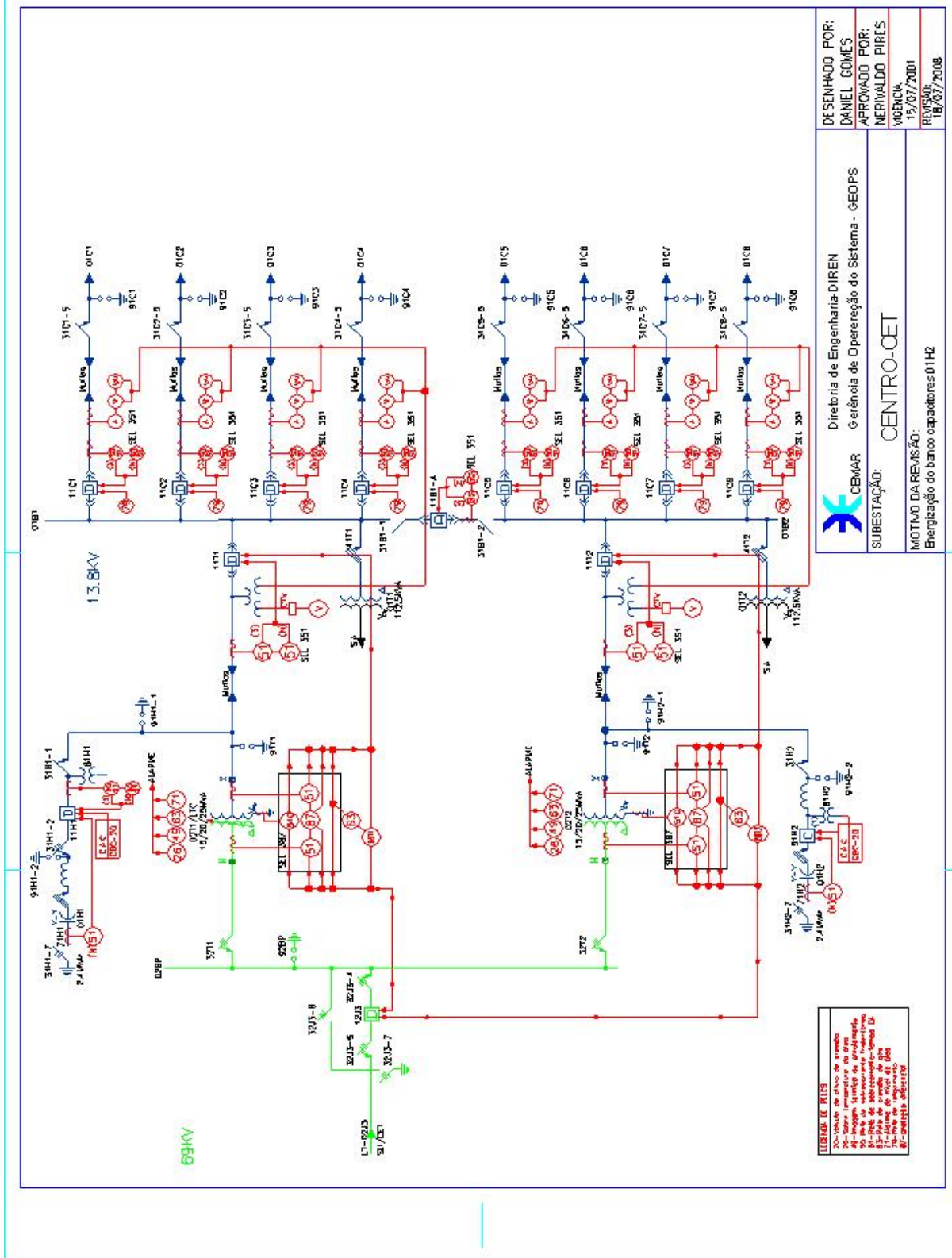
- Treinamento dos operadores: desenvolver uma tela de simulação de falhas para fins de treinamento de operadores usando a mesma base de conhecimento, bastando para isto a inclusão de um módulo de encadeamento para frente;
- Incluir no SE mecanismos de tolerância a falha, tais como *time out* e teste de consistência (já em fase de implementação);
- Melhorar a *interface* do Gerenciador Estatístico, para poder ser utilizado como suporte à manutenção, apresentando análises estatísticas de confiabilidade dos diversos subsistemas e ramos da árvore de falhas;

- Desenvolver o SE para as demais subestações da CEMAR.

Como futuros trabalhos, sugerem-se:

- Desenvolvimento do algoritmo com a filosofia de orientação a objeto, onde poderiam-se utilizar famílias de equipamentos, tais como relés, contadores, transformadores auxiliares, facilitando bastante as análises estatísticas de falhas por tipo de equipamento;
- Sistema Especialista distribuído com pré-processamento remoto, com a finalidade de reduzir a complexidade do processo, e aumentar o grau de certeza na obtenção da solução, através da adição de mais regras específicas a cada sub-processo;
- Desenvolvimento de Sistema Integrado, incorporando as seguintes funções adicionais: prognóstico, rotinas de análise de configurações operacionais e rotinas de análise de confiabilidade dos planos de manutenção.

APÊNDICE A - DIAGRAMA DE ATUAÇÃO DAS PROTEÇÕES DA SUBESTAÇÃO CENTRO (CEMAR)



<p style="text-align: center;">Diretoria de Engenharia DIREN Gerência de Operação do Sistema - GEOPS</p>	DESENHADO POR: DANIEL GOMES
SUBESTAÇÃO: CENTRO-CET	APROVADO POR: MERNIVALDO PIRES
MOTIVO DA REVISÃO: Energização do banco capacitores 01H2	LOCALIZAÇÃO: MOENÇA
	DATA: 15/07/2001
	REVISÃO: 18/07/2008

REFERÊNCIAS

- ABB, **MicroSCADA Pro LIB 500 4.2**, Manual, ABB Transmit Oy, 2006.
- ARAÚJO, E. O.; Queiroz, J. C.; Ferreira, D. G. **Um Processador de Alarme Inteligente**, SBA Controle & Automação, Vol. 4, No. 2, Maio/Junho 1994.
- AUGUST, J. **Applied Reliability Centered Maintenance**, Pennwell Pub, 2000.
- BIROLINE, A. **Reliability Engineering: Theory and Practice**, Springer Verlag, 1999.
- BLACKBURN, J. L. **Protective Relaying**, Marcel Dekker Inc., 2006.
- BLOOM, N. **Reliability Centered Maintenance**, Handcover, 2005.
- BRATKO, I. **PROLOG Programming for Artificial Intelligence**, Addison-Wesley Pub Co, 2000.
- BROADWATER, R. P., Thompson, J. C., Rahman, S. and Sargent, A., **An Expert System for Integrated Protection Design with Configurable Distribution Circuits**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, Nr. 2, April 1994.
- CAMARGO, C. C. **Confiabilidade Aplicada a Sistemas de Potência Elétrica**, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1981.
- CAMINHA, A. C., **Introdução a Proteção dos Sistemas Elétricos**, Editora Edgard Blucher, 1977.
- DALEY, D. T., **The Little Black Book Of Reliability Management: What Do You Have A Right To Expect?**, Industrial Press, 2007.
- DELFINO, B.; Invernizzi, M.; Morini, A. **Knowledge Based Restoration Guidelines**, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 5, Nr. 3, July 1992.
- DHILLON, B. S.; Singh, C. **Engineering Reliability: New Techniques and Applications**, John Willey & Sons, 1981.
- DILLON, T. S.; Laughton, M. A. **Expert System Applications to Power Systems**, Prentice Hall International Series in Power System Computation, 1990.
- DURKIN, J., **Expert Systems: Design and Development**, Prentice Hall, 1998.
- EBELING, C. E. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**, McGraw-Hill, Inc., 1997.
- ELIPSE SOFTWARE, **Manual do Usuário, 2009**
- GERARD, A.W. **Bayesian Artificial Intelligence**, Springer Netherlands, 2003

GUPTA, M. M.; Sinha, N. K. **Intelligent Control Systems: Theory and Applications**, IEEE Neural Networks Council, sponsor, 1996.

HODGES, A. **Alan Turing: The Enigma**, Walker & Co, 2000.

HOPGOOD, A. A. **Knowledge-based systems for engineers and scientists**, CRC Press, 1993.

HSU, Y. Y. *et al.* **An Expert System for Locating Distribution System Faults**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, Nr. 1, January 1991.

IEEE. **IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems**, IEEE Industry Applications Society, 1991.

KRUTZ, R. L., **Securing SCADA Systems**, Wiley, 2005.

LEVINE, R. I.; Drang, D. E.; Edelson, B. **A Comprehensive Guide to AI and Expert Systems**, McGraw-Hill, Inc., 1986.

LIFSCHITZ, V.; McCarthy, J. **Formalizing Common Sense: Papers by John McCarthy**, Book News, Inc, 1998.

MOURSUND, D. G. **Brief Introduction to Educational Implications of Artificial Intelligence**, 2006.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems**, 2nd Edition, 2004.

NORVIK, P.; Russel S. **Artificial Intelligence: Modern Approach**, 3rd edition, 2009.

PAPOULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**, McGraw-Hill, Inc., 3rd ed., 1991.

PATRICK, D. T. **Practical Reliability Engineering**, 2nd Edition, Wiley, 2002.

PINHEIRO, H. B. **Sistema Especialista para Operação de Subestações de Energia Elétrica**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, 1995.

POHL, I. **Bi-directional Search in Machine Intelligence**, Vol 6. B. Meltzer & D. Michie (Eds.), American Elsevier, New York, 1971.

RICH, E. **Artificial Intelligence**, McGraw-Hill, 1990.

SAKAGUCHI, T.; Matsumoto, K. **Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration**, IEEE Trans. on PAS, Vol. 102, Nr.2, February 1983.

SCHALKOFF, R. J. **Artificial Intelligence: An Engineering Approach**, McGraw-Hill, Inc., 1990.

WATERMAN, D. A. **A Guide to Expert System**, Addison-Wesley Publishing Company, 1986.