JOSÉ AQUILES BAESSO GRIMONI

PROTÓTIPO DE UM CONJUNTO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA OPERAÇÃO,MONITORIZAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SUBESTAÇÕES

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtencão do titulo de Doutor em Engenharia.

São Paulo
1994

JOSÉ AQUILES BAESSO GRIMONI
ENGENHEIRO ELETRICISTA - EPUSP - 1980
MESTRE EM ENGENHARIA DE ELETRICIDADE - EPUSP - 1988

PROTÓTIPO DE UM CONJUNTO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA OPERAÇÃO,MONITORIZAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SUBESTAÇÕES.

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtencão do titulo de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Energia e Automação Elétricas

Orientador :
Prof. Dr. Lineu Belico dos Reis.

1994

Grimoni, José Aquiles Baesso
Protótipo de um conjunto de sistemas especialistas para operação, monitorização e manutenção de subestações. São Paulo, 1994.
123 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Operação de Subestações 2. Monitorização de Subestações 3. Manutenção de Subestações 4. Sistemas Especialistas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t

Dedico este trabalho:

aos meus filhos Guilherme, Bianca,
a minha companheira Vera e
aos meus pais e avós.

Cad. Nº 2308965
22/08/94
OK

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

TERMO DE JULGAMENTO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORAMENTO

Aos 27 *dias do mês de* abril *de* 1994, *às* 14:00 *horas,* no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas *da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores* Drs. Lineu Belico dos Reis, Orientador do candidato, Germano Lambert Torres, Alexandre Pinto Alves da Silva, Luiz Cláudio Ribeiro Galvão e Nelson Kagan Nº Func. Ors.: 411060

iniciou-se a Defesa de Tese de Doutoramento do Senhor
JOSÉ AQUILES BAESSO GRIMONI Nº Func. 432644

Título da Tese "Protótipo de um Conjunto de Sistemas Especialistas para Operação, Monitorização e Manutenção de Subestações"

Concluída a argüição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora atribuído ao candidato as seguintes notas:

Prof.Dr.Lineu Belico dos Reis	(8,5)	(oito e cinco)
Prof.Dr.Germano Lambert Torres	(8,5)	(oito e cinco)
Prof.Dr.Alexandre Pinto Alves da Silva	(8,5)	(oito e cinco)
Prof.Dr.Luiz Cláudio Ribeiro Galvão	(8,5)	(oito e cinco)
Prof.Dr.Nelson Kagan	(8,5)	(oito e cinco)

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pelo Secretário da Seção de Pós-Graduação.

São Paulo, 27 *de* abril *de* 1994.

Presidente BReis

Secretário Mara Fátima de Jesus Luz Sanches

Observações:

Homologada pela C.P.G. em reunião realizada à 09/05/1994

BC

Universidade de São Paulo
Biblioteca da Escola Politécnica

FT-781

[77]ARIKUNI, K. et al. Use of an expert system applied to power equipment's fault diagnosis. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 3°, Kobe, 1991. **Proceedings**, Tokio, 1991, p. 602-8.

[78]FUSHIMI, T. et al. Turbine-generator on-line monitoring and diagnostic expert system. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 1°, Helsinki, 1988, **Proceedings**, Stockolm, p. 11-14/19.

[79] SUN, Y. et al. RETEX(relay testing expert): an expert system for analysis of relay testing data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.7, n.2, p. 986-94, jan. 1992.

AGRADECIMENTOS

- ao meu orientador Lineu Belico dos Reis pelo incentivo e pelas sugestões e críticas durante a elaboração deste trabalho;

- ao amigo e professor da EPUSP Carlos Márcio Vieira Tahan, pelo seu interesse no meu trabalho e por suas contribuições durante a definição e a elaboração do mesmo;

- ao colega Lourenço Matakas Jr, por ter me enviado de Tóquio vários artigos dos Congressos Internacionais de Sistemas Especialistas Aplicados a Sistemas de Potência(ESAPS);

- aos professores Alcyr Monticelli da UNICAMP, Germano Lambert Torres da EFEI e a José Antônio Jardini, colega de departamento na EPUSP pelo fornecimento de bibliografia de interesse para a execução deste trabalho;

- ao amigo e professor da EPUSP Geraldo Francisco Burani, pelo empréstimo de seu micro, sem o que esta tese não seria feita;

- ao amigo e professor da EPUSP Walter Kaiser, pelo seu estímulo e colaboração germânicos;

- a amiga e bibliotecária da EPUSP Neussa Yoscimoto, pela revisão bibliográfica do trabalho;

- a equipe técnica da operação da transmissão da CESP, Júlio em particular, pelo fornecimento de dados reais para testes do programa;

- e a todos amigos e colegas do Departamento de Engenharia e Energia e Automação Elétricas da EPUSP que me incentivaram, em especial ao professor Luiz Cláudio Ribeiro Galvão pelo estímulo e confiança

SUMÁRIO

Lista de tabelas

Lista de figuras

Resumo

"Abstract"

1 INTRODUÇÃO 1

2 SISTEMAS ESPECIALISTAS APLICADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2. 1 O que são inteligência artificial e sistemas especialistas? 4

2. 2 Desenvolvimento de sistemas especialistas 10

2. 2. 1 Etapas de desenvolvimento 10

2. 2. 2 Modelagem do conhecimento 11

2. 2. 3 Métodos de procura de soluções 13

2. 3 Sistemas especialistas aplicados a sistemas de potência 13

2. 3. 1 Considerações gerais 13

2. 3. 2 Estado da arte de sistemas especialistas aplicados à sistemas de potência 15

2. 3. 3 Estado da arte de sistemas especialistas para operação, monitorização e manutenção de subestações. 22

3 A OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES SEM E COM AUTOMATIZAÇÃO

3. 1 Considerações gerais 30

3. 2 Características fundamentais de uma SE 30

3. 2. 1 Tipos de SE 32

3. 2. 2 Arranjos de subestações 33

3. 2. 3 Elementos de subestação 34

3. 2. 4 Interface homem-máquina e alarmes em subestação 37

3. 3 Relacionamento operador/informação em SE 41

4 PROTÓTIPO DE UM CONJUNTO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS PARA O AUXÍLIO NA OPERAÇÃO, MONITORIZAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SUBESTAÇÕES

4. 1 Modelo do conjunto de sistemas especialistas 47

4. 1. 1 Arquitetura do sistema 47

4. 1. 2 Dados do sistema de supervisão 48

4. 1. 3 Tratamento de alarmes 49

4. 1. 4 Diagnóstico de faltas 50

4. 1. 5 Reconfiguração de SE 50

4. 1. 6 Análise da manutenção 50

4. 1. 7 Comunicação entre os sistemas especialistas 51

4. 2 A Escolha da linguagem de desenvolvimento 51

4. 2. 1 Linguagens e ferramentas de desevolvimento 51

4. 2. 2 Porque o PROLOG? 53

4. 2. 3 O TURBO-PROLOG 54

4. 3 A SE utilizada 57

4. 3. 1 Unifilar 57

4. 3. 2 Modelo da topologia da SE 57

4. 3. 3 Modelo hierárquico da SE 59

4. 3. 4 Modelo dos alarmes existentes 60

4. 3. 5 Modelo de Relacionamento dos Alarmes e dos Equipamentos 66

4. 3. 6 Detalhes operacionais da SE 71

5 A IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS ESPECIALISTAS PROPOSTOS

5. 1 As bases de conhecimento utilizadas 75

5. 1. 1Regras para o tratamento de alarmes 77

5. 1. 2 Regras para a localização de defeitos 83

5. 1. 3 Regras para a reconfiguração da SE 84

5. 1. 4 Sistema especialista para avaliação do desempenho da manutenção 86

5. 2 A interface homem-máquina e arquivos de trabalho 89

6 TESTES E SIMULAÇÕES

6. 1 Casos simulados 96

6. 2 Resultados 98

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7. 1 Aspectos fundamentais do desenvolvimento 107

7. 2 Conclusões e sugestões para futuros trabalhos 108

Referências Bibliográficas 113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fases do desenvolvimento de um sistema especialista
Figura 2.2 - Diagrama de eventos no tempo de um processo comum em uma subestação
Figura 2.3 - Escala de tempo das interfaces de alarmes com o operador
Figura 3.1 - Faixas de tempo típicas para eventos comuns em usinas e subestações
Figura 3.2 - Diagramas unifilares de esquemas possíveis de subestações
Figura 4.1 - Diagrama com o fluxo de informações do sistema proposto
Figura 4.2 - Fluxo de execução em um programa em TURBO-PROLOG.
Figura 4.3 - Diagrama unifilar da subestação utilizada
Figura 4.4 - Diagramas unifilar e equivalente em arcos e nós de um trecho de uma subestação
Figura 5.1 - Diagramas e/ou de algumas regras para tratamento de alarmes
Figura 5.2 - Estrutura do grafo da subestação adotada
Figura 5.3 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de desenho da SE
Figura 5.4 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de tratamento de alarmes
Figura 5.5 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de localização de defeitos
Figura 5.6 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de reconfiguração da SE
Figura 6.1 - Diagrama unifilar da SE para o estado operacional inicial
Figura 6.2 - Diagrama unifilar da SE para o estado operacional final do primeiro caso
Figura 6.3 - Diagrama unifilar da SE para o estado operacional final do segundo caso

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação do conhecimento humano e o artificial

Tabela 2.2 - Comparações entre o processamento convencional e a engenharia do conhecimento

Tabela 3.1 - Parâmetros típicos de equipamentos que podem ser monitorados

Tabela 4.1 - Comparações entre as linguagens e os shells de desenvolvimento de sistemas especialistas

Tabela 4.2 - Características básicas do PROLOG e das linguagens ditas procedurais

Tabela 4.3 - Comparações entre o TURBO-PROLOG e o PROLOG padrão

Tabela 4.4 - Pontos digitais e os alarmes respectivos da subestação adotada

Tabela 4.5 - Pontos de comando da subestação adotada

Tabela 4.6 -Pontos analógicos da subestação adotada

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

BC-base de conhecimento

COD - Centro de Operação da Distribuição

COR - Centro de Operação Regional

COS - Centro de Operação do Sistema

EDF - "Eletriceté de France"

EMS - "Energy Management System" - Sistema de Gerenciamento de Energia

ERAC - Esquema Regional de Alívio de Carga

ES- "expert system" - sistema especialista

IA-inteligência artificial

KBS - "Knowledge Based System" - Sistema Baseado em Conhecimento

MI-máquima de inferência

MIS - "Management Information Systems"

LISP - "LISt Processing" - processamento de listas

OIS - "Operation Information Systems"

PROLOG-"PROgraming LOGic" - programação em lógica

SCADA - "Supervisory Control and Data Aquisition" - Controle Supervisório e Aquisição de Dados

SDCD - Sistema de Supervisão Digital de Controle Distribuido

SE- subestação

TAL - Transferência Automática de Linha

UTR - Unidade Terminal Remota

RESUMO

O trabalho apresenta o protótipo de um conjunto de sistemas especialistas para o auxílio na operação, monitoração e a avaliação do desmpenho da manutenção de uma subestação de energia.

Os sistemas especialistas propostos tem como objetivos básicos: o tratamento de alarmes da subestação, para depuração e triagem dos mesmos durante perturbações facilitando a análise e ações do operador; a localização de defeitos através da iteração entre alarmes gerados(fatos), regras que relacionam alarmes a causas(base de conhecimento) e a estrutura que relaciona este conjunto de regras(máquina de inferência); a reconfiguração da subestação para a transferência de cargas entre circuitos através de um conjunto de manobras gerados por algoritmos de busca e de regras ligadas aos limites das grandezas elétricas dos equipamentos da rede; e ainda a análise do desempenho da manutenção baseada no conceito de índice de mérito operativo aplicado a subestações.

A protótipo preve o desenvolvimento utilizando a linguagem PROLOG, que é voltada para o tratamento declarativo de informações. Foram utilizados dados de uma subestação de uma empresa concessionária de energia para que se pudesse avaliar melhor o desenvolvimento das bases de conhecimento e da própria arquitetura do conjunto e de sua comunicação. Os testes efetuados mostraram resultados promissores e com grau de acerto elevado, o que indica que o sistema desenvolvido, é um embrião confiável para maiores sofisticações. O trabalho termina por apresentar estas novas possibilidades de aperfeiçoamento do sistema. .

ABSTRACT

This work presents a set of expert systems for operation, supervision and maintenance of a electrical energy substation.

The function performed by the expert systems presented here are: alarm processing, fault diagnosis, reconfiguration and the analysis of the maintenance performance.

The system was developed in PROLOG language. Substation characteristics, data and information has been provided by a São Paulo utility company. The knowledge basis for the expert systems was developed with basis in such information. Tests were carried out to verify this system performance including the architeture and communication. The results are very promissing and with a high level of confidence, which means that this system can be used as a seed for future improvement. The work ends by suggesting such improvements and new applications.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os cursos de engenharia elétrica em sistemas de potência tem sofrido um processo de esvaziamento no Brasil devido principalmente a sua lentidão em incorporar a seus currículos, disciplinas e projetos de pesquisa compatíveis com o estado da arte desta área a nível internacional. Não se objetiva aqui discutir os motivos deste procedimento, mas sim, reconhecer o fato e usar a necessidade de superar esta falha como uma motivação para o trabalho.

Computação gráfica, paralelismo de computadores, sistemas especialistas, reconhecimento de padrões, redes neurais, lógica nebulosa, algoritmos genéticos, realidade virtual, tratamento de sinais, automação dos sistemas e de componentes do mesmo e a aplicação de novas tecnologias de materiais como por exemplo as fibras ópticas em sistemas de supervisão e controle, são temas dos mais atuais que, em nível internacional estão sendo aplicados a várias áreas de estudo da engenharia, inclusive a área de sistemas de potência. Cabe a nós docentes e pesquisadores universitários acelerar a introdução destas novas técnicas no ambito da pesquisa e ensino brasileiros. Com este esforço de modernização se conseguirá não só atuar para o desenvolvimento tecnológico do país, como também motivar alunos e pesquisadores a se embrenhar nestes novos e promissores objetos de pesquisa na área de sistemas de potência, formando a massa crítica necessária ao seu desenvolvimento sustentado. Novos cursos de pós-graduação poderão ser montados e oferecidos, e em pouco tempo alguns tópicos destes cursos serão introduzidos em disciplinas de graduação, novos temas de projetos de formatura e de dissertações e teses relacionadas com estas áreas de estudo serão criados, permitindo assim aos alunos de graduação e pós-graduação e à comunidade que trabalha diretamente com energia o acompanhamento atualizado destas novas tecnologias e a inserção numa área de ponta em termos mundiais.

Deve-se considerar que um grande número dos problemas da área de sistemas de potência apresentam graus de complexidade especiais e configuração de grande porte, resultando na necessidade de processamento numérico pesado e de modelagens sofisticadas dos fenômenos estudados. Estas novas técnicas que surgiram na área de computação aplicada, como

processamento paralelo de computadores, computação gráfica, inteligência artificial(sistemas especialistas, reconhecimento de padrões e linguagem natural), redes neurais, lógica nebulosa("fuzzy logic"), algoritmos genéticos, se encaixam perfeitamente como ferramentas de auxílio na resolução destes problemas.

Como resposta a tais preocupações, existe hoje na EPUSP e especificamente no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas um grupo de professores e pesquisadores buscando formar o núcleo básico para o domínio e a disseminação da aplicação destas novas técnicas às áreas de operação , planejamento e projeto dos Sistemas de Potência.

Foi com base no cenário acima exposto e também devido à grande motivação pessoal em estudar este novos temas de computação aplicada a área de sistemas de potência, que este assunto foi eleito para desenvolvimento na tese ora sendo apresentada.

Este trabalho faz parte de um projeto mais amplo que pretende desenvolver um conjunto de sistemas especialistas voltados para o auxílio da operação de subestações, usinas e do próprio sistema interligado. A subestação foi escolhida para iniciar o projeto por que ela é o componente menos complexo, o que certamente permitirá um desenvolvimento mais seguro e com menor risco de desvios nos objetivos traçados.

Para um melhor entendimento do estado da arte internacional do assunto tratado e maior clareza na apresentação do conjunto de sistemas visualizado, resolveu-se dividir à apresentação do trabalho em seis partes, descritas sucintamente a seguir:

O capítulo 2 apresenta os sistemas especialistas e os modos usuais para seu desenvolvimento, enfatizando em seguida as principais aplicações atualmente efetuadas na área de sistemas de potência.

No capítulo 4 se apresenta o conjunto de sistemas especialistas aqui propostos para a operação de subestações, são mostradas as linguagens de desenvolvimento de sistemas especialistas e é descrita a subestação adotada no desenvolvimento do protótipo com seu diagrama unifilar, suas regras de operação e seus principais alarmes e limitações.

No capítulo 5 são apresentados detalhes do desenvolvimento dos protótipos dos sistemas especialistas propostos.

O capítulo 6 mostra as simulações que foram feitas para testar o sistemas especialistas desenvolvidos.

Finalmente, no capítulo 7 se apresentam as análises finais, conclusões e sugestões de futuros trabalhos

CAPÍTULO 2

SISTEMAS ESPECIALISTAS E SUA APLICAÇÃO A SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1-O que são inteligência artificial e sistemas especialistas?

Para se falar de inteligência artificial e de sistemas especialistas precisa-se conceituar o que é inteligência. A utilização da palavra inteligência no cotidiano é muito comum, mas para conceituá-la encontra-se muita dificuldade, pois é difícil materializar e quantificar um conceito abstrato criado pelo homem. Aspectos que pode-se dizer estão vinculados à inteligência são:

- a capacidade de aprendizagem;
- a capacidade de criação e de resolução de problemas;
- a criatividade;
- o comportamento biológico;
- noção da própria existência;
- a capacidade de ter desejos e vontades.

O estudo da inteligência envolve múltiplas áreas do conhecimento como filosofia, psicologia e biologia, o que leva as vezes a choques de conceitos e visões. A tendência atual é de desenvolvimento de estudos através de grupos multidisciplinares incluindo também pessoas de áreas de aplicação destes conceitos, como os engenheiros, matemáticos, etc.

A discussão sobre os conceitos básicos de inteligência artificial é muito polêmica, pois não se tem ainda nem uma boa definição do que é ser inteligente ou do que é inteligência. Portanto existem várias definições de inteligência artificial[1], [2]. Pode-se definir sistemas que utilizam inteligência artificial como aqueles em que se procura simular o comportamento humano com grande número de regras heurísticas. Já os sistemas baseados em conhecimento("knowledge-based systems") podem ser considerados um sub-grupo da inteligência artificial, que separa explicitamente o domínio do conhecimento do resto do sistema[3].

A criação do QI(Quociente de Inteligência) em 1912[4] foi uma tentativa de quantificar o nível de inteligência de uma pessoa, o que segundo Feingeinbaum: "Causou danos a sociedade em geral, e à educação em particular". Em 1930 os matemáticos estruturaram a lógica formal enquanto os psicólogos desenvolveram a teoria cognitiva para tentar explicar o comportamento humano. Na década de 40 foram desenvolvidos os primeiros computadores a válvula e Turing apresentou a proposta de um teste, para verificar se um computador era inteligente("Teste de Turing"). Na década de 50 surgiram as primeiras linguagens de alto nínel, como FORTRAN, COBOL e ALGOL. Em 1956 John MCcarthy(Darthmouth College) propos uma nova área de estudos, que reunia conceitos da psicologia, lógica e computação; nascia a inteligência artificial. Nesta mesma época surgiram os primeiros sistemas voltados para resolver problemas("GPS - General Problem Solvers"). Na década de 70 surgiram as propostas dos primeiros sistemas especialistas utilizando lógica combinacional e regras heurísticas para resolver certos problemas.

Pode-se dizer que os sistemas especialistas são uma classe das possíveis aplicações da inteligência artificial, assim como o processamento de linguagem natural e o reconhecimento de imagens ou padrões.

O processamento de linguagem natural trata do desenvolvimento de sistemas que permitam ao usuário comum se comunicar com o computadòr utilizando a sua linguagem cotidiana, ou seja, sua linguagem natural. O sistema seria capaz de analisar uma frase e identificar cada um de seus elementos sintáticos(sujeito, verbo e o objeto) e em seguida transformar a frase em um comando de computador. O processamento em linguagem natural pode também ser usado para desenvolver um sistema de conversação mais amigável em um sistema especialista do tipo de diagnóstico, simulando o inquisidor(o médico no caso de um sistema de diagnóstico de doenças) em uma conversação o mais próxima possível entre dois seres humanos, embutindo perguntas com características de comportamento típicas de seres humanos, como bom humor, tristeza, indiferença, etc. Ele também pode ser usado para interpretar textos para poder traduzi-los para outras línguas.

Os sistemas para reconhecimeto de imagens ou padrões são voltados para aplicações que devem identificar certos padrões bem definidos de imagens ou de comportamento de um sistema, que pode ser expresso por alguma grandeza fisica. Reconhecido o padrão ou um conjunto deles o sistema deve efetuar um conjunto de operações pré-estabelecidas. Um típico sistema de reconhecimento de padrão é o de visão de um robô, que deve identificar um objeto e modificar sua posição relativa a uma referência ou movimentá-lo para outro lugar.

Os sistemas especialistas são aqueles que baseados em regras oriundas do conhecimento de especialistas em determinada área e em regras de domínio público simulam o comportamento de um especialista na ánalise e resolução de um problema[1].Para os engenheiros não interessa muito se os sistemas especialistas podem ser considerados inteligentes ou não[5], mas interessa muito a capacidade destes sistemas de resolver problemas de engenharia, que ou não tem solução fácil pelos métodos convencionais ou requer muito trabalho(custo elevado) para se chegar a solução desejada.

Uma das primeiras aplicações de sistemas especialistas desenvolvida foi a do sistema MYCIN(Stanford) para diagnóstico de infecções bacterianas. Foi montada uma base de dados constituida pelo conhecimento e a experiência de vários especialistas na área. O sistema através de um conjunto de perguntas e da sua interação com a base de dados montada chegava a diagnósticos com um nível de acerto muito maior do que o de um médico especializado na área. Este desenvolvimento definiu claramente uma das principais áreas de aplicação dos sistemas especialistas, que é a de diagnóstico, tais como diagnósticos de doenças ou causas de falhas no funcionamento de equipamentos ou de sistemas, no caso da engenharia. Os sistemas DENDRAL(análise química) e o PROSPECTOR(prospecção geológica) são também exemplos dos primeiros sistemas especialistas desenvolvidos.

Um sistema especialista para o tratamento de alarmes é um sistema que recebe um grande número de informações e consegue processá-las a tempo de dar subsídios para o operador tomar alguma decisão emergencial. O sistema especialista serve como um filtro de sinais, bloqueando os sinais redundantes,ou aqueles consequentes dos sinais principais, e os sinais que não tem interesse

para o processo em andamento. Esta é uma aplicação típica para operação de sistemas com supervisão de um número grande de sinais, que mostram se os equipamentos, subsistemas e o sistema como um todo estão operando dentro das faixas de trabalho adotadas. No caso o operador receberá um número grande de informações em uma situação de anormalidade e poderá não ser capaz de analisar e chegar a uma sequência de operações necessárias a tempo de isolar e de evitar a propagação do problema pelo resto do sistema. Um exemplo desta aplicação seria a operação de uma subestação ou de uma central hidroelétrica/termoelétrica ou ainda de um sistema de potência integrado. É importante lembrar que os sistemas de controle, comando, supervisão e proteção em subestações, em usinas geradoras ou em qualquer sistema que tenha a presença deles estão interligados a tal nível que não podemos separá-los mais. Quando se fala em automação deve-se pensar em um sistema que englobe as quatro áreas de aplicação.

Os sistemas especialistas utilizados hoje são na sua grande maioria ferramentas de auxílio a qualquer atividade, não sendo utilizados como tomadores de decisão ou como efetivadores de operações, principalmente em processos de tempo real em que o nível de segurança requerido de uma tomada de decisão é altissimo e também se exige alta confiabilidade. Um problema a ser resolvido é a confiabilidade e a segurança quanto aos sinais que alimentam um sistema especialista, ou seja, se o sistema pode receber sinais errados ou com deformações ele pode chegar a conclusões, que podem gerar decisões catastróficas para o processo em que ele está sendo aplicado. Outro grande problema é a dificuldade de se testar previamente de modo efetivo um sistema especialista, pois em geral as linguagens utilizadas para o seu desenvolvimento(PROLOG, LISP e outras) não possuem características estrutruradas dificultando a sua testabilidade.

Os sistemas especialistas já desenvolvidos ou em fase de testes de protótipos são quase todos utilizados em modo externo("off-line") em sistemas de tempo real ou nos quais a tomada de decisão deve ser rápida. Outra característica é que eles são processados em máquinas independentes daquela máquina que coleta os dados, faz o tratamento de sinais e executa o controle de chaves ou outros dispositivos que podem ser comandados remotamente. A comunicação é feita através de "links" de comunicação ou via arquivos quando possível.

Para se visualizar o alcance e as restrições associados aos sistemas especialistas, lembra-se que a modelagem do conhecimento humano é muito complexa e o seu equivalente artificial sofre de algumas limitações, mas apresenta algumas vantagens, como pode-se ver na tabela comparativa a seguir[3].

CONHECIMENTO HUMANO	CONHECIMENTO ARTIFICIAL
perecível	permanente
difícil de transferir	fácil de transferir
difícil de documentar	fácil de documentar
imprevisível	consistente
caro	razoável
discriminatório	imparcial
individualizado	social
criativo	sem inspiração
adaptável	inflexível
enfoque amplo	enfoque restrito
baseado em sensocomum	técnico

Tabela 2.1 - Comparação do conhecimento humano e o artificial

Dentro do contexto apresentado pode-se visualizar as principais características dos sistemas especialistas, que são:

- resolvem problemas muito complexos tão bem quanto ou melhor que especialistas humanos;

- raciocinam heuristicamente, utilizando regras práticas("rules of thumb");

- interagem com usuários humanos utilizando interfaces do tipo texto ou gráficas com menús e representações esquemáticas dos processos ou ainda através de linguagens naturais;

- manipulam e raciocinam sobre descrições simbólicas;

- funcionam com dados errados e regras incertas de julgamento, ou seja, não há consistência normalmente;

- contemplam hipóteses múltiplas simultaneamente;

- explicam porque estão fazendo determinada pergunta e
- justificam suas conclusões mostrando o raciocínio completo para chegar a elas.

Com essas características os sistemas especialistas são voltados para classificação(diagnose, interpretação e análise de relatórios de erros), projeto(combinar estruturas que satisfaçam um determinado objetivo) e suporte a decisão(explorar alternativas, fazer previsões e resolver problemas).

A tabela a seguir procura sumarizar as principais diferenças de um sistema de processamento convencional(procedural) de um de engenharia de conhecimento, usado no desenvolvimento dos sistemas especialistas.

PROCESSAMENTO CONVENCIONAL	ENGENHARIA DE CONHECIMENTO
representação e uso de dados	representação e uso de conhecimento
algorítmico	heurístico
processo repetitivo	processo dedutivo
manipulação efetiva de extensos bancos de dados	manipulação efetiva de extensas bases de conhecimentos

Tabela 2.2 - Comparações entre o processamento convencional e a engenharia do conhecimento

Um sistema especialista é composto por tres partes básicas:

- base de conhecimento(domínio do conhecimento) composto por fatos e regras;
- máquina de inferência(máquina para a solução de problemas baseada em conhecimento) composta por um interpretador que decide como aplicar o conhecimento e um elemento que decide quando e em qual ordem devem ser aplicadas diferentes partes do domínio do conhecimento. Quando se utiliza uma linguagem de baixo nível como PROLOG e LISP deve-se implementar a máquina de inferência, já em linguagens específicas para o desenvolvimento de sistemas especialistas("Shell") como OPS3, OPS5 a máquina de inferência faz parte da própria linguagem

- interface homem-máquina com o operador do sistema e com o engenheiro de conhecimento para editar a base de conhecimento.

2.2-Desenvolvimento de sistemas especialistas

2.2.1- Etapas de desenvolvimento

Segundo Waterman[4] as principais etapas no desenvolvimento de um sistema especialista são as seguintes:

- identificação - como se pode caracterizar os aspectos importantes do problema;
- conceitualização - que conceitos são necessários para produzir uma solução;
- formalização - como pode o conhecimento ser formalmente apresentado;
- implementação - que regras incorporarão o conhecimento;
- testes - como as regras podem ser validadas.

O gráfico mostrado na figura a seguir mostra como as etapas de desenvolvimento de um sistema especialista se relacionam:

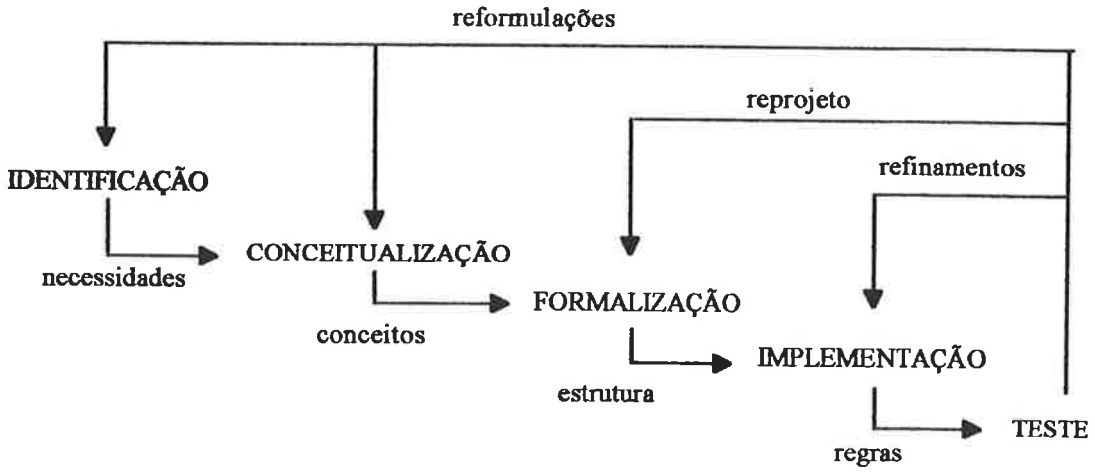

Figura 2.1 - Fases do desenvolvimento de um sistema especialista

No desenvolvimento de sistemas especialistas existem tres personagens básicos que trocam informações entre si, são o especialista no problema, o engenheiro de conhecimento, que é aquele que vai gerar as regras basedo na experiência dos especialistas e o usuário final, que será fonte de informação para gerar uma melhor interface.

Uma das etapas mais importantes do desenvolvimento de um sistema especialista é o processo de adquirir conhecimento dos especialistas. As principais técnicas utilizadas são as seguintes:

- observação no local de trabalho;
- discussão do problema;
- descrição do problema;
- análise do problema;
- refinamento do problema;
- teste do sistema desenvolvido, pelo especialista;
- validação do sistema especialista.

2.2.2-Modelagem do conhecimento

O conhecimento é o principal elemento de trabalho na construção dos sistemas especialistas e pode-se dizer que a sua aquisição e a sua modelagem é o ponto nevrálgico do desenvolvimento dos sistemas. O engenheiro de conhecimento deve, através de metodologias e ferramentas apropriadas, adquirir o conhecimento dos especialistas na área em que deseja desenvolver o sistema especialista de modo a poder modelá-lo e colocá-lo na base de conhecimento e se necessário desenvolver a máquina de inferência.

Uma etapa importante no desenvolvimento de um sistema especialista é a modelagem do conhecimento. Básicamente existem as seguintes possibilidades de modelagem[3]:

- redes semânticas;
- regras de produção;
- "frames";

- "scripts".

As redes semânticas possuem nós que representam objetos, conceitos e situações de um determinado domínio e arcos, que representam as relações entre os nós. Os nós podem pertencer a classes, que podem transmitir por herança conceitos e situações de aplicação a nós filhos.

As regras de produção são regras do tipo "se X então Y" ou seja se a expressão X é verdade implica em Y verdade, lógicamente pode-se ter expressões que são uma combinação de expressões através dos operadores lógicos "and", "or" ou "not". A expressão X é a causa e a expressão Y é o efeito. Um conjunto de regras pode ter efeitos de algumas regras como causa de outras, levando assim a uma árvore de testes lógicos que, dependendo do ponto de partida, ou seja, qual é a expressão inicial, pode gerar uma sequência de testes de regras para frente("forward chaining") ou para trás("backward chaining").

Os "frames" estão relacionados com as características ou procedimentos de um objeto ou situação. Um objeto e/ou situação são expressos em "slots". Os "slots" tem nomes e campos internos, que podem ser propriedades com valores alfanúméricos atribuídos. Pode-se construir também uma rede de "frames".

Os "scripts" são uma estrutura de representação de conhecimento, que procura descrever uma atividade utilizando conceitos de redes de "frames" e de regras associados.

A formalização do conhecimento é feita pela lógica proposicional ou sentencial(formal), no caso da modelagem por regras de produção. No caso de modelagem por redes semânticas ou "frames" a mesma é efetuada pela lógica de predicados, pois se trabalha com classes de objetos, a relação entre os mesmos e utilizam-se sentenças, variáveis, funções matemáticas e expressões.

Existe a possibilidade de introduzir parâmetros nebulosos("fuzzy") na modelagem de um sistema especialista além dos clássicos parâmetros alfanuméricos e lógicos.

2.2.3-Métodos de procura de soluções

As ferramentas de procura de uma solução de um problema são muito importantes na implementação de um sistema especialista pois a modelagem adotada gera uma rede de soluções, que pode ser um grafo ou uma árvore. As principais ferramentas para a procura são as seguintes:

- "blind search" -(busca cega - gera todos os caminhos possíveis até achar a solução);
- "depth first search"(procura em profundidade primeiro);
- "breadth first search"(procura em largura primeiro);
- "hill climbing"(aprimoramento do "depth first search" usando heurística, ou seja, procura a partir do nó mais promissor na ordem decrescente);
- "best first search(procura o melhor primeiro ou seja os nós mais promissores);

No caso de se procurar a solução ótima pode-se gerar todas as soluções possíveis e escolher a melhor, usar programação dinâmica ou o método "branch-bound"(baseado em pesos para cada ramo da árvore de alternativas - algoritmo A*) ou ainda a combinação delas.

A escolha do melhor método de busca está diretamente ligada com o modelo de estrutura de dados e do tipo do problema(grafo do encadeamento de regras do sistema especialista).

2.3-Sistemas especialistas aplicados em sistemas de potência.

2.3.1-Considerações gerais

As principais justificativas para a aplicação de sistemas especialistas em sistemas de potência são as possibilidades de torná-los mais confiáveis e seguros de maneira que a qualidade e a disponibilidade de entrega de energia aos usuários aumente substancialmente. Com o auxílio dos sistemas especialistas no planejamento, projeto, operação e na manutenção de sistemas ou equipamentos de potência se diminue o tempo para obtenção da resposta de qualquer problema que tenha múltiplas variáveis com várias restrições, pois a solução se baseia no conhecimento de especialistas no assunto, expresso em forma de regras.

Os problemas que tem um número grande de sinais ou mensagens que devem ser tratadas por uma pessoa, esbarram principalmente com o problema da barreira cognitiva humana, que é, em poucas palavras, a limitação humana de processar muitas informações e dar uma resposta em tempo hábil para o processo em análise. Este problema se agrava mais em sistemas de processamento em tempo real. Processos numéricos normais as vezes em situações de emergência não conseguem chegar a soluções razoáveis devido principalmente a restrições do próprio processo. Muitos problemas de planejamento, projeto, operação e manutenção são muito complexos e consomem muito tempo, por serem orientados a múltiplos objetivos sujeitos a múltiplas restrições. Os sistemas especialistas são uma boa ferramenta para resolver estes problemas típicos apresentados acima. Por exemplo, no caso da operação pode-se ter aplicações tanto para auxiliar o operador na análise de tratamento de sinais(alarmes), orientando-o quanto a um conjunto de manobras que isole um defeito e transfira cargas de um circuito para outro quando possível, como também para efetuar o diagnóstico da atuação da proteção ou do conjunto de fatos ocorridos durante uma perturbação no sistema ou no equipamento sob análise.

As principais áreas de aplicação de sistemas especialistas a sistemas de potência são as seguintes:

- diagnóstico de falha de um sistema ou equipamento que foge as características básicas de funcionamento;
- prescrição de uma cura ou correção para um mal funcionamento de um sistema ou equipamento;
- análise da situação ou estado de um sistema ou equipamento através da monitoração de dados;
- predição de consequências que podem ocorrer em uma determinadaa situação;
- seleção de alternativas mais viáveis entre um número possível e bem determinado;
- projeto, planejamento e acompanhamento de um sistema sujeito a restrições definindo assim etapas e tempos para execução destas;
- controle de um sistema ou de um equipamento englobando funções de análise de situações e predição;

- ensino ou treinamento de pessoal baseado em um conjunto de conhecimentos que devem ser assimilados.

2.3.2-Estado da arte de sistemas especialistas aplicados à sistemas de potência

Os primeiros artigos sobre sistemas especialistas aplicados em sistemas de potência surgiram em 1982. Um dos primeiros sistemas desenvolvidos pela divisão de energia nuclear do EPRI em 1976 foi um sistema para monitorar vibrações e diagnosticar o mal funcionamento de grandes bombas em usinas nucleares.

Com o acidente de "Three Miles Island" em 1979 o interesse em desenvolver sistemas especialistas para a produção de energia elétrica aumentou muito, pois eles poderiam auxiliar na operação dos reatores e auxiliar em situações de emergência evitando assim erros humanos na manutenção e na operação. Foram desenvolvidos muitos outros sistemas por empresas e por universidades americanas, mas quase todos voltados para sistemas de diagnóstico ou de sensoreamento de sistemas ou equipamentos de potência.

Em 1983[7] surgiu um trabalho sobre um reconfigurador de redes que acabaria sendo a primeira grande aplicação na operação de sistemas elétricos de potência. Vários outros países desenvolveram sistemas especialistas durante a década de 80 e o início da década de 90, podendo-se citar entre eles Canadá, Inglaterra, República Federal Alemã, Austrália, Suiça, França e China.

Uma estatística apresentada na referência [6] mostra a distribuição percentual dos tipos de sistemas desenvolvidos a nível industrial. A distribuição é a seguinte:

- diagnóstico(41%);
- planejamento e acompanhamento(19%);
- controle(18%);
- projeto(11%);
- predição(8%);

- instrução e treinamento(3%).

Y. Tamura apresentou em 1990 no livro de T. S. Dillon e Michael A. Laughton [8] uma pesquisa realizada pela força tarefa TF07 do grupo de trabalho WG02 do comite de estudos SC38 do CIGRE[9], intitulada "Expert Systems for Power System Analysis and Techniques" , realizada em vários países, que nos mostra alguns dados importantes sobre o estado da arte do desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados em sistemas de potência. Um dos resultados da pesquisa mostrou que a distribuição dos sistemas desenvolvidos quanto a sua aplicação foi a seguinte:

- planejamento(14.34%);
- monitoração(35.41%);
- controle(27.68%);
- análise de sistemas(13.34%);
- educação e simulação(3.1%) e
- outros(6.1%).

Quanto ao equipamento utilizado para o desenvolvimento dos sistemas especialistas houve uma preferência por se desenvolver em super-minis ou em estações dedicadas ao trabalho com inteligência artificial devido principalmente a sua performance e sua interface homem-máquina mais amigável. Uma estatística da utilização é apresentada a seguir:

- VAX (26.11%):
- IBM (14.74%):
- Symbolics(10.12%);
- Apollo(9.06%);
- CDC(5.68%);
- SUN(4.53%);
- outros(29.77%).

Quanto as principais linguagens utilizadas a distribuição foi a seguinte:

- LISP(28.10%);

- PROLOG(25.00%);
- FORTRAN(25.00%);
- C(10.90%);
- Pascal(6.30%);
- outras(4.70%).

Já quanto as ferramentas de inteligência artificial utilizadas("shell's") as principais foram as seguintes:

- KEE(22,90%);
- OPS83(14.30%);
- ART (5.70%);
- ALOUETTE(5.70%);
- ESHELL(5.70%);
- SAGE (5.70%);
- outras(40.0%).

Outra importante informação obtida nesta pesquisa foi a de que a grande maioria das instituições engajadas no desenvolvimento de sistemas especialistas são empresas concessionárias de energia(40.0%) seguidas pelas universidades(20.90%), institutos de pesquisa(20.0%) e finalmente pelos fábricantes(19.10%) . Pode-se também observar na pesquisa que nos casos dos trabalhos feitos em cooperação a maioria é conduzida pelas empresas concessionárias de energia, o que é justificavel pois elas são as principais fontes do conhecimento usado em seus sistemas.

Quanto ao número de regras dos sistemas especialistas elas se situam na grande maioria em valores menores do que 300; os sistemas especialistas aplicados a monitoração e planejamento tem casos com conjuntos de regras maior que 200.

Em geral os sistemas especialistas voltados para a operação estão vinculados com sistemas EMS("Energy Management System"). Uma das principais justificativas para a utilização de sistemas especialistas é a perda da experiência do operador quando ele se aposenta ou troca de

emprego sem que haja um registro dos seus conhecimentos sobre o sistema que ele operava. Outra boa justificativa é o aumento na confiabilidade da decisão do operador com o auxílio de um sistema especialista. Já foram desenvolvidos vários trabalhos sobre sistemas especialistas aplicados na operação, dentre eles pode-se citar os seguintes:

- diagnóstico de faltas;
- processamento de alarmes;
- fluxo de potência para planejamento;
- fluxo de reativos e controle de tensão;
- chaveamento;
- reconfiguração;
- avaliação de segurança;
- estabilidade em transitórios;
- alocação de unidades geradoras;
- treinamento de operadores;
- interface amigável;
- manutenção;
- automação de Subestações;
- proteção com relés microprocessados;
- transmissão em Corrente Continua;
- serviços auxiliares de usinas ou de subestações;
- diagnóstico "on-line" de equipamentos.

Os sistemas especialistas desenvolvidos para sistemas de potência tem apresentado os seguintes problemas principais:

- problemas com a interface entre o sistema especialista e programas de processamento numérico que em geral é feita ou por um banco de dados comum ou através da utilização de processamento paralelo em uma máquina com multiprocessamento;

- com o processamento de computação simbólica é lento em comparação com o processamento algoritmico puro. Um meio de melhorar a velocidade é diminuir o tempo de acesso aos dados, outra alternativa é utilizar máquinas dedicadas ao processamento simbólico;

- o maior problema com os sistemas especialistas é a aquisição de conhecimento e a sua qualidade;

- problemas de consistência entre as regras do banco de dados de conhecimento ou a superposição de conhecimentos, que podem ser evitados através de técnicas para resolução de conflitos;

- necessidade de uma manutenção eficaz do sistema especialista, que deve ser implementada principalmente quando ele fizer parte de um sistema do tipo EMS.

Uma pesquisa mais recente do CIGRÉ[10] apresenta alguns resultados de discussões e investigações sobre sistemas especialistas aplicados a operação e controle de sistemas de potência. Como principais conclusões pode-se citar as seguintes:

- a metodologia de sistemas especialistas pode ser aplicável a um problema se não existe um método analítico, ou se o método analítico é parcialmente conhecido ou ainda se é conhecido mas ineficiente;

- a metodologia pode ser aplicada se o número de especialistas na área de interesse é pequeno e de difícil acesso;

- a aplicação de sistemas especialistas na operação tem sido considerada como um experimento da ferrramenta, como uma solução profissional ou ainda como parte de uma nova solução integrada de operação;

- existe grande preocupação com o impacto dos sistemas especialistas no dia a dia dos usuários. Para sua diminuição, deve-se envolver os usuários no desenvolvimento e nos testes do sistema especialista;

- o custo do desenvolvimento de sistemas especialistas é muito alto;

- o uso prático dos sistemas especialistas hoje em dia ainda é muito modesto;

- alguns tipos de problemas que tratam com informações incertas podem necessitar de outras alternativas de solução como lógica "fuzzy" , redes neurais, etc.

- existe um sentimento geral que técnicas de inteligência artificial como um todo penetrarão massivamente nos departamentos de operação das empresas concessionárias nos próximos anos.

Existem vários artigos publicados sobre as aplicações de sistemas especialistas enfocadas aqui neste trabalho. Sobre a utilização de sistemas especialistas no tratamento de alarmes o CIGRÉ publicou uma pesquisa coordenada por T. S. Dillon em dezembro de 1991[11] que chegou as seguintes conclusões gerais:

- há diferentes classificações da severidade das dificuldades de se tratar os alarmes a nível hierárquico do sistema de potência a que eles pertencem(subestação terminal, subestação de interligação, sistema regional e o sistema central);

- basicamente as principais dificuldades encontradas pelos operadores são: alarmes não muito específicos, alarmes muito específicos, muitos alarmes, falta de alarmes, falsos alarmes, múltiplos alarmes para um evento, mensagens muito rápidas para a leitura, uma falta de ordem de priorização dos alarmes, alarmes que se mantém após o reconhecimento, a não indicação de um estado estável, alarmes resultantes da ação de operadores, mensagens dirigidas a operadores errados, etc;

- das trinta organizações que responderam a pesquisa 22 estavam desenvolvendo ou pretendiam desenvolver um sistema especialista para tratamento de alarmes. Das oito que não estavam desenvolvendo duas tinham começado mas terminado o projeto, uma na fase de protótipo e outra na fase de testes de campo.

- a maioria do conhecimento utilizado no desenvolvimento veio de operadores especialistas(50%), em seguida de manuais(20%) , procedimentos computacionais do sistema SCADA(20%) e outros(10%);

- a maioria dos sistemas é executada em uma máquina separada daquela onde está o sistema SCADA e a comunicação é feita através de redes;

- a maioria dos sistemas está sendo desenvolvida sem auxilio externo, alguns sistemas com o auxílio de universidades, de consultores e de companhias de "software";

Uma outra pesquisa[12] publicada pelo CIGRÉ em 1992 mostra que a maioria das aplicações em planejamento e em operação tem as seguintes características:

- os principais critérios para a escolha da aplicação a ser desenvolvida utilizando a técnica de sistemas especialistas foram em ordem decrescente de casos : o teste da técnica(9), a redução da carga do operador(7), a normalização de ações de decisão rápida(4), a prevenção de erros

humanos(4), a manutenção do conhecimento do sistema(3) e a não eficiência de programas procedurais(3);

- a maioria do conhecimento adquirido foi através de entrevistas com os especialistas, estudos de casos e da utilização de conhecimento de domínio publico;

- quanto ao desempenho, a maioria dos sistemas teve um índice de respostas corretas variando de 75 a 100 %,

- já quanto ao tempo de resposta os valores obtidos foram dos mais variados desde alguns segundos até horas. Este parâmetro de avaliação depende muito da aplicação, do computador e da linguagem utilizada;

- foram utilizadas várias linguagens como FORTRAN, LISP, PROLOG, C , PASCAL e "shell" como o OPS5, OPS83, KEE, NEXPERT, etc;

- os computadores utilizados foram desde PC's, estações de trabalho(SUN e APOLLO), Mainframes e até máquinas LISP.

Pode-se vislumbrar várias aplicações futuras de sistemas especialistas em sistemas de potência, dentre elas as seguintes:

- diagnósticos de falhas de equipamentos em operação ou fora de operação;

- automação integrada e inteligente de subestações incluindo o controle e a proteção;

- despacho econômico de sistemas de potência levando em conta a minimização da operação e o aumento da segurança;

- proteção adaptativa de relés digitais, ou seja, os relés alteram seus ajustes para outros valores dependendo do estado da rede;

- controle da operação de geradores onde o sistema especialista pode ser uma ferramenta de auxílio ao operador.

Recentemente foram publicadas duas revistas especiais("Proceedings of the IEEE" e "Electrical Power & Energy Systems") sobre sistemas especialistas aplicadas a sistemas de potência[13], [14].

Já aconteceram 4 simpósios internacionais(Estocolmo-1988, Washington 1989, Tokyo-1991, Melbourne-1993) sobre sistemas especialistas aplicados a sistemas de potência.(ESAPS).

No Brasil existem alguns trabalhos nesta linha, dos quais pode-se citar o de Paulo Neves Lacerda[15] que trata de um protótipo de um sistema especialista para operação de subestações em alta tensão, os trabalhos do grupo de inteligência artificial da Escola Federal de Engenharia de Itajubá(EFEI)[16],[17],[18] e [19]; o trabalho de Júlio Cesar Braz de Queiroz sobre tratamento de alarmes[20] e o trabalho de Edson Satochi Gomi(EPUSP)[21], que trata das aplicações da inteligência artificial e da programação em lógica nos problemas de supervisão e controle de sistemas de potência. Existem também grupos de estudo em outras universidades como a PUC-RJ, UFRJ e UNICAMP e em empresas como a PETROBRÁS, METRO-SP, INPE.

As concessionárias de energia do Brasil não mostraram ainda muito interesse em investir nestas novas técnicas, possivelmente por falta de conhecimento das suas potencialidades.

2.3.3 - Estado da arte de sistemas especialistas para operação, monitorização e manutenção de subestações.

Os primeiros sistemas de tratamento de alarmes se baseavam em sistemas procedurais que classificavam os alarmes em níveis de prioridade e apresentavam estes alarmes aos operadores sob diversas formas, como alarmes sonoros e visuais, em terminais de vídeo(texto e em diagramas unifilares), em arquivos de eventos("log files"), relatórios contínuos e outros.

Um trabalho recente [22] mostra a importância do instante em que ocorre o alarme, pois o tempo associado ao alarme não é o tempo em que ocorre o evento e sim o tempo em que a informação chega no centro de controle. Isto pode ocasionar uma falha em uma regra que depende do encadeamento temporal de fatos(alarmes). A necessidade do sincronismo em relação a um relógio(valor de tempo conhecido) é extremamente importante para se evitar erros de análise de encadeamento de alarmes. O ideal em um sistema de tratamento de alarmes seria ter um

diagrama que mostrasse o eventos ocorridos na sequência de tempo de modo a permitir uma melhor visualização do que ocorreu na perturbação.

O trabalho de F. Hein[23] mostra um gráfico no tempo com a ativação de uma sequência de eventos comum em uma subestação, ou seja, um relé atua , manda um sinal de "trip" para um disjuntor e um sinal de religamento para o disjuntor também é disparado. Também são mostrados neste gráfico os sinais de alarme resultantes, os mesmos sinais na unidade terminal remota(RTU) e o atraso de tempo quando chegam na central de controle ocasionado pela transmissão.

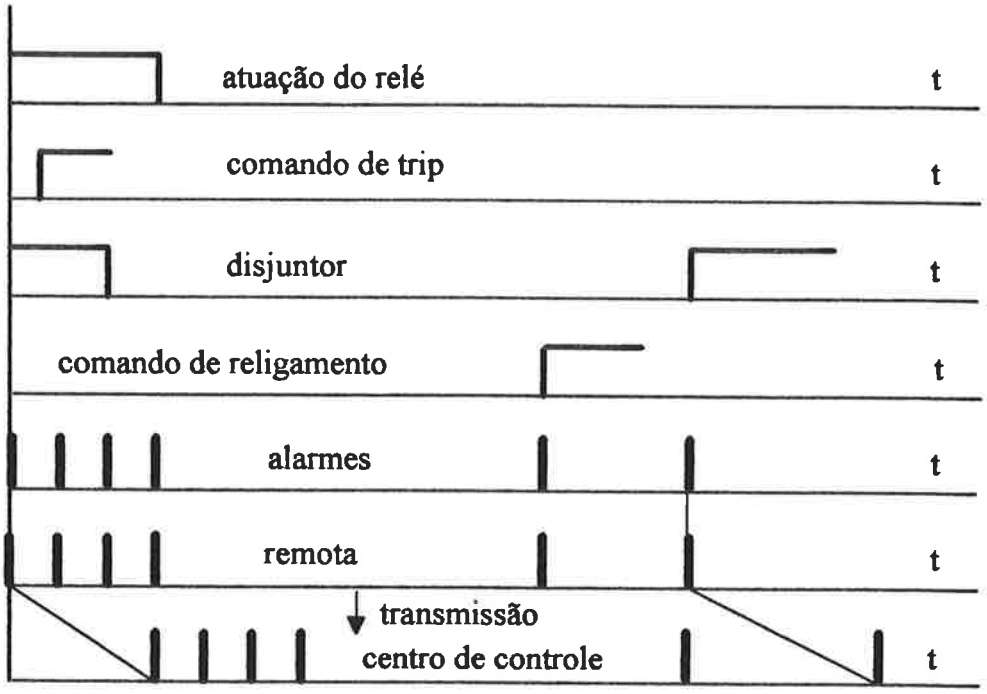

Figura 2.2 - Diagrama de eventos no tempo de um processo comum em uma subestação

Outro trabalho de F. Hein[24] apresenta conforme a figura a seguir uma escala de tempo das várias interfaces que o operador pode ter com os alarmes ocasionados por eventos em uma subestação.

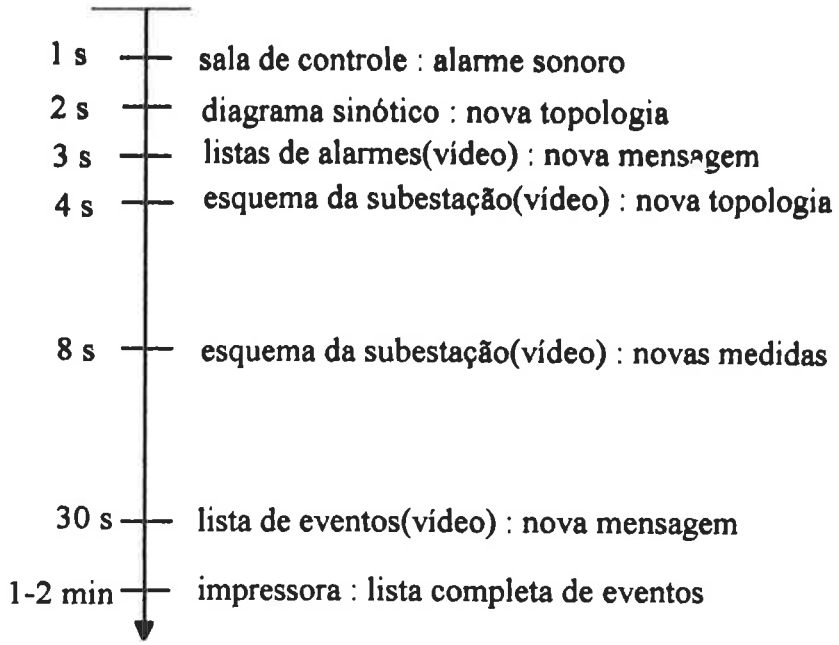

Figura 2.3 - Escala de tempo das interfaces de alarmes com o operador

O tratamento clássico de intertravamento e sequência de chaveamento em uma subestação já utilizando recursos computacionais, que respeitam os limites operacionais de cada equipamento, como por exemplo a capacidade de abrir em carga ou não, são apresentados nos artigos[25] e [26].

Um dos primeiros artigos sobre o uso de sistemas inteligentes para o tratamento de alarme("IAP") é o de Wollenberg[27] de 1986. Neste artigo ele apresenta um sistema baseado em regras, desenvolvido em LISP com as seguintes categorias de regras:

-regras de nível de alarme associadas aos tipo de elemento
- regras que sinalizam quando há perda de geração;
- regras que excluem alarmes sem importância;
- regras que determinam quando um alarme deve ser impresso ou gravado;
- regras que apresentam mensagens especiais.

O artigo de Chihiro Fukui e Junzo Kawakami[28] de 1986 foi um dos primeiros artigos que mostrou a influência das informações da proteção na detecção de defeitos utilizando as técnicas de sistemas especialistas. Eles analisaram a detecção de defeitos para faltas simples e faltas múltiplas utilizando os conceitos de zona de proteção e de divisão em áreas escuras.

Talukdar et alli [29] apresentaram um artigo em 1986 sobre dois sistemas desenvolvidos em OPS-5 , sendo que um simulava o comportamento da proteção e outro fazia diagnóstico de defeitos(para uma falta e diversas combinações de falhas de operação de relés e disjuntores). É sugerida uma modelagem da rede em tres níveis:

- nível topologico : interligação entre componentes;
- nível de dispositivos : descrição de cada dispositivo e seu parâmetros de importância;
- nível de comportamento : descrição das estratégias de controle

Em 1987 Woolemberg e Sakaguchi [30] publicaram um artigo sobre as possibilidades da aplicação de inteligência artificial em problemas de operação de sistemas elétricos de potência. Neste artigo são elencadas algumas aplicações, como por exemplo: tratamento de alarmes, operações de chaveamento, controle de tensão, restauração, planejamento com fluxo de potência, planejamento de geração, treinamento, simulação de cenários de treinamento.

O trabalho de Schulte et alli [31] também apresenta uma análise das possibilidades de aplicação de inteligência artificial a problemas de operação de sistemas de potência. É feita uma análise mais detalhada da introdução em um sistema EMS("Energy Manegement Systems") de um sistema para análise de contingências e outro para processamento de alarmes.

O trabalho de Dialynas e Machias[32] de 1987 apresenta uma metodologia baseada numa classificação inicial dos tipos de faltas possíveis em uma subestação e na sua topologia, para em seguida poder usar um procedimento apropriado para reconfigurá-la.

Stalder e Germond[33] apresentaram no PSCC de 1987 um sistema especialista desenvolvido em PROLOG para tratamento de alarmes e reconfiguração de uma subestação.

Talukdar e Cardozo em 1988[34] sugerem uma arquitetura híbrida para resolver o problema de diagnóstico de defeitos utilizando uma rede de computadores, que podem operar em paralelo um sistema algorítmico e em outro um sistema especialista.

Em 1988(Estocolmo) houve o primeiro Simpósio de Sistemas Especialistas Aplicados a Sistemas de Potência("ESAPS") , nele foram apresentados alguns trabalhos sobre operação de subestações, dos quais pode-se citar os seguintes:

- Mihelčic, Gubina e Ogorelec[35] apresentaram um sistema especialista desenvolvido em PROLOG para diagnóstico de defeitos baseados nas informações da proteção e dos disjuntores;
- Stalder et alli[36] desenvolveram um sistema especialista em PROLOG com interface gráfica em C para o chaveamento em subestações;
- Brezillon e Fauquembergue[37] apresentaram a proposta do sistema SEPT desenvolvido na linguagem ALOUETTE e em Pascal para auxiliar na supervisão(localização de defeitos) de uma subestação;

Wong e Cheung[38] apresentaram um sistema desenvolvido em PROLOG para a distribuição de carga nas barras de uma subestação baseados na topologia, que permite gerar os caminhos possíveis, e em regras de restrição que permitem eliminar as soluções não viáveis.

A EDF desenvolveu o sistema especialista ALOUETTE[39] em PASCAL para fazer o tratamento de alarmes de centros regionais. O sistema tem cerca de 200 regras e leva aproximadamente 2 s para realizar o tratamento de uma base de 2500 alarmes em uma máquina Microvax 2.

Uma pesquisa sobre o número excessivo de alarmes foi apresentada em 1989 por Prince, Woollenberg e Bertagnolli[40] concluíndo que para reduzir o volume de alarmes que os operadores devem analisar, principalmente em situações de emergência, seria necessário que cada evento gerasse um único alarme e não todos os alarmes intermediários, que não tem mutio significado naquele instante. O modelo atual(digital) de geração de alarmes baseado na velha arquitetura de que para cada ponto monitorado tem-se duas posições possíveis de trabalho, uma

normal e outra anormal, sendo que o alarme é gerado quando se passa para a posição anormal, deve ser mudado, pois ele é uma das principais causas da geração de um número elevado de alarmes.

Em 1989, em Seattle, houve o segundo Simpósio de Sistemas Especialistas Aplicados a Sistemas de Potência("ESAPS") , nele foram apresentados alguns trabalhos sobre operação de subestações, dos quais pode-se citar os seguintes:

- Heydeman, e Harrewijn[41] desenvolveram na linguagem Delfi-II um sistema especialista para o tratamento de alarmes;

- Bijoch , Harris e Volkman[42] desenvolveram um sistema de processamento de alarmes inteligente("IAP") na linguagem GENESYS com o uso de funções auxiliares para a interface desenvolvidas em FORTRAN e CYBIL. A máquina de inferência é escrita em CYBIL e permite o encadeamento para trás e para frente("backward"e "forward chaining");

- Purucker et alli[43] desenvolveram um sistema especialista para o tratamento de alarmes utilizando a linguagem C para tratar os dados e o "shell" Nexpert Object para desenvolver o sistema especialista em uma estação VAX 3200;

O artigo de Zhang , Hope e Malik[44] de 1990 apresenta um sistema especialista, desenvolvido em PROLOG, para a otimização(mínimo custo operacional) do chaveamento em um subestação

Em 1991, em Kobe, houve o terceiro Simpósio de Sistemas Especialistas Aplicados a Sistemas de Potência("ESAPS") , nele foram apresentados alguns trabalhos sobre operação de subestações, dos quais pode-se citar os seguintes:

- Zhang , Hope e Malik[45] propõem um sistema integrado de diagnóstico de uma subestação baseado em conhecimento("KBID") utilizando tres modelos : configuração física, de estrutura hierárquica e de relação causa-efeito;

- Wang e Dillon[46] apresentam uma segunda geração de sistemas especialistas para diagnóstico de defeitos baseada em Redes de Petri temporais, que são uma metodologia que

permite tratar problemas em que há transição de estados, como no caso da proteção e dos elementos de seccionamento da rede(chaves e disjuntores);

Protopapas e Psaltiras[47] desenvolveram um sistema especialista em TURBO-PROLOG, com rotinas em C para a comunicação com o sistema SCADA, que processa alarmes e faz diagnóstico de defeitos. O sistema possui uma interface que utiliza menús e uma representação gráfica do unifilar dos equipamentos da subestação.

McDonald, Burt e Young[48] desenvolveram dois sistemas especialistas, APEX desenvolvido em C e o RESPONDD desenvolvido em PROLOG, para o processamento de alarmes e diagnóstico de defeitos respectivamente. Para se ter uma idéia da velocidade do APEX ele reduziu um número de 236 alarmes para 48 mensagens em 5 s em uma máquina HP-9000/360.

Kumano et alli [49] desenvolveram um sistema especialista para detecção de defeitos utilizando as seguintes estratégias: processamento por intersecção de zonas de proteção(primárias e de retaguarda) e pela utilização de informações sequênciais de eventos simultâneos(atuação de relés e de disjuntores).

Em 1993, em Melbourne, houve o quarto Simpósio de Sistemas Especialistas Aplicados a Sistemas de Potência("ESAPS") , nele foram apresentados alguns trabalhos sobre operação de subestações, dos quais pode-se citar os seguintes:

- Vale e Moura [22]apresentaram um trabalho sobre um processador inteligente de alarmes para a Centro de Controle do Sistema de Portugal , que foi desenvolvido em PROLOG (em uma estação DEC 5000/200) e é capaz de processar 1000 alarmes por minuto;

- Rodriguez et alli[50] apresentam um artigo que compara redes neurais e sistemas baseados em conhecimento para a aplicação em diagnóstico de defeitos. A análise mostra que a resposta das redes neurais é muito mais rápida, que o tempo de resposta é independente da complexidade do problema, que é possível a implementação de multiprocessamento e qualquer hipótese de defeito é testada;

- Ypsilantis e Yee[51] apresentam um artigo que mostra a possibilidade da aplicação de algoritmos genéticos para o diagnóstico de defeitos e o processamento de alarmes. O resultado do estudo se mostrou promissor no caso de diagnóstico de defeitos, mas no caso de processamento de alarmes se mostrou limitado;

- foram apresentados tres artigos[52], [53] e [54] na área de sistemas especialistas aplicados à manutenção de usinas e subestações, principalmente a questão do escalonamento da manutenção;

O artigo de S. D. Kamiramis et alli[55] de julho de 1991 apresenta um sistema especialista para planejamento da manutenção de uma subestação baseado na disponibilidade de mão de obra e equipamentos e do histórico de manutenção de cada equipamento. O sistema admite possibilidades de manutenção preditiva e corretiva. Este sistema foi desenvolvido em TURBO-PROLOG.

O artigo de Rava Levi e de Mark Rivers[56] de janeiro de 1992 mostra um sistema especialista para avaliação de testes de manutenção de equipamentos de subestações. Este sistema gera relatórios e faz análises em cima dos dados de teste dos equipamentos, sugere possíveis testes adicionais e gera um planejamento automático de manutenção. O sistema foi desenvolvido em um PC-386 no sistema operacional UNIX.

No caso de manutenção preditiva de sistemas industriais o trabalho de Emerson Cabrera Paraíso[57] apresenta a proposta de um sistema especialista para a análise de óleos isolantes e lubrificantes baseado nos ensaios físico-químicos e cromatográficos, implementado em ambiente Windows e em C++.

CAPÍTULO 3

A OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES SEM E COM AUTOMATIZAÇÃO.

3.1-Considerações gerais

O objetivo principal deste capítulo é apresentar as principais características de subestações elétricas relacionadas com os sistemas especialistas propostos neste trabalho. Desta forma, são ressaltados e sumarizados aqueles aspectos que de um modo ou outro, influeciaram o desenvolvimento efetuado. Assim as listas de configurações, equipamentos, alarmes, etc, apresentadas são diretamente relacionadas com o tipo de SEs abordadas no trabalho(indicado no capítulo 4). A aplicação dos sistemas propostos, no entanto, para SEs de maior ou menor porte, poderá ser efetuada apenas com ajustes das referidas listas e a consequente adaptação dos sistemas. Isto garante a generalização dos principais conceitos e critérios aqui apresentados.

3.2-Características fundamentais de uma SE

Nas subestações antigas os operadores dispunham na sala de controle um painel com um quadro sinótico e vários medidores analógicos de tensão, corrente, potência e energia e também medidores oscilográficos que mostravam o comportamento de uma grandeza com o decorrer do tempo. O operador era obrigado a anotar em intervalos bem definidos de tempo os valores de algumas destas grandezas. Ele poderia verificar a atuação de relés e dispositivos de seccionamento, como os disjuntores, através de sinalizações no painel de controle. Para realizar manobras ele deveria acionar botões no próprio painel de controle. Os sinais dos sensores eram trazidos para a sala de controle através de cabos acomodados em canaletas que percorriam a área da subestação deixando-as, assim, sujeitas a um elevado teor de interferência eletromagnética.

As subestações modernas são todas automatizadas[58],[59] e [60], ou seja, existe acoplado a cada uma um sistema de supervisão e controle digitalizado(SCADA - "Supervisory Control and Data Aquisition"), que pode ser centralizado ou distribuído. O sistema centralizado é composto por um conjunto de sensores, que medem sinais analógicos(que podem ser convertidos em sinais digitais quando necessário) ou digitais alimentando um computador

central na sala de controle. O sistema apresenta ainda uma unidade de vídeo que além de apresentar os dados de eventos que estão ocorrendo, possui uma representação esquemática da subestação, eliminando a necessidade de um quadro cinótico. O sistema dístribuido possui unidades remotas(microprocessadores), que podem realizar algum processamento local, e uma unidade central de processamento de sinais compondo uma rede de computadores, incluindo também sensores de sinais elétricos e uma interface gráfica esquemática da subestação e de seus componentes principais como no sistema centralizado.

As unidades terminais remotas (UTR) podem estar na sala de controle ou distribuídas pelo pátio da subestação próximas aos "bays" que estão supervisionando e controlando, permitindo assim algum processamento local a nível de atuação.

Nas configurações mais modernas de subestações há uma integração entre a supervisão, controle e a proteção e o uso de unidades remotas localizadas próximas dos equipamentos. Esta configuração se tornou viável com o advento dos relés microprocessados, que permitem a implementação dos algoritmos de proteção com maior versatilidade do que com os relés eletromecânicos ou estáticos e, quando possível, independentemente do processador central. As subestações com sistemas digitalizados distribuídos tem uma redução na cablagem pois as estações remotas estão localizadas próximas dos "bays" dos equipamentos que elas supervisionam, controlam e protegem, de maneira a distribuir a inteligência do sistema. Outra grande vantagem é a estrutura modular tanto de "hardware" como de "software" a ser utilizada nestas configurações facilitando assim a sua manutenção, operação e expansão.

Os novos sistemas de supervisão e controle de sistemas de potência tem uma estrutura hierárquica mais descentralizada(SDCD- Sistema Digital de Controle Distribuído), que permite os sistemas de menor hierarquia tomar deciões sobre alguns eventos locais e se comunicar com o nível hierárquico superior em outras situações. A estrutura hierárquica global compreenderia o centro de controle central, os centros de controle regionais, as subestações principais, as usinas de geração, as subestações de derivação e dentro das subestações as unidades terminais remotas(UTR). Quanto a comunicação entre os sistemas ela é feita através de redes que possuem tres tipos básicos de conexão: anel, rede e estrela.

Os tempos de duração de alguns eventos na subestação são importantes para que se possa determinar os tipos de parâmetros que devem ser supervisionados. A figura a seguir mostra um gráfico com as faixas de tempo típicas de alguns eventos comuns em subestações e usinas.

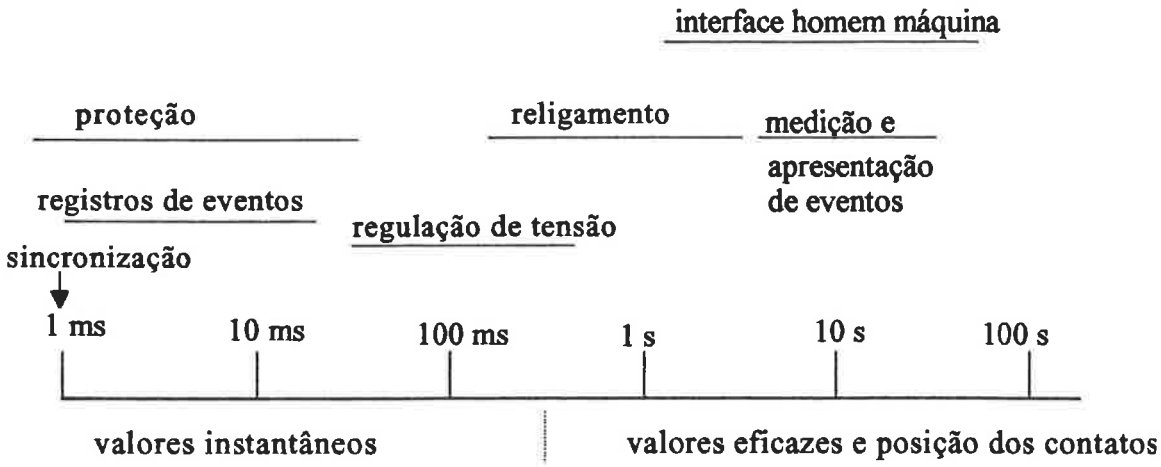

Figura 3.1 - Faixas de tempo típicas para eventos comuns em usinas e subestações

3.2.1-Tipos de SE

Quanto a sua situação no sistema as subestações podem ser classificadas como:

- seccionadoras- seccionam linhas de transmissão(mesmo nível de tensão);
- secionadoras e abaixadoras - interligam vários níveis de tensão(transformadores);
- em derivação - alimentadas por uma derivação de uma linha de transmissão;
- radiais ou terminais - tem uma única fonte de alimentação.

Os tipos básicos de subestações de transmissão são as de seccionamento e de derivação. As subestações de derivação como já diz o nome derivam das linhas de transmissão para alimentar cargas ou conjuntos de cargas que se localizam próximas ou não ao trajeto da linha, já as de seccionamento cortam as linhas de transmissão definindo um ponto de concentração de potência, que pode possuir várias linhas em diferentes níveis de tensão, alimentando conjuntos de cargas distintas.

3.2.2-Arranjos de subestações

Os arranjos de subestações são classificados conforme o número de barramentos e os tipos de conexão entre eles. Os principais tipos de arranjos para as subestações do porte enfocado neste trabalho, conforme figura 3.2, são os seguintes:

- barramentos simples;
- barramento simples seccionado;
- barramento duplo;
- barramento principal e transferência;
- barramento principal e transferência e reserva;
- barramento em anel;
- barramento duplo com disjuntor e meio.

O arranjo de barramento simples é o de menor custo mas tem a menor confiabilidade e flexibilidade pois coloca a SE fora de serviço , em caso de defeito no barramento. O barramento simples seccionado é uma alternativa ao anterior que possibilita a operação de metade da SE quando surge um defeito no barramento.

O esquema com barramento duplo aumenta consideravelmente a flexibilidade de manobras, a confiabilidade e a facilidade de manutenção da SE, permitindo a operação com quaisquer conjuntos de LT's ou transformadores, no barramento auxiliar, facilitando a manutenção em disjuntores e nos barramentos; mas, apresentando, por outro lado, custo muito maior. Um esquema próximo ao anterior e com um custo menor é o do barramento principal e transferência que facilita também a manutenção de todos os disjuntores, embora um defeito no barramento implique na perda da SE, o que pode ser minimizado utilizando um seccionamento no barramento principal por chaves ou disjuntores.

O esquema anterior pode ser melhorado com o acréscimo de um barramento de reserva , que pode ser conectado a todos os disjuntores dos "bays" através de seccionadoras. Com esta configuração denominada barramento principal, transferência e reserva pode-se evitar o seccionamento de barramentos em caso de defeitos, através da utilização do reserva. O

barramento de reserva pode ser incorporado no de transferência , através da supressão e conexão das seccionadoras a ele associadas, com o barramento principal.

O arranjo em anel permite a manutenção de todos os disjuntores e de secções de barramento e exige apenas um disjuntor por linha de transmissão e por transformador. Defeitos em secções de barramentos são facilmente isoladas, mas prejudicam as linhas e transformadores a eles conectados.

A última das configurações de subestações aqui tratadas é a de barramento duplo com disjuntor e meio que apresenta certas vantagens adicionais à de barramento duplo, mas com custo maior. Esse esquema é obtido através da conexão de dois barramentos com conjuntos de tres disjuntores em série , de modo que de duas conexões centrais emergem duas LT's ou uma LT e um transformador. Qualquer elemento nessa conexão pode ser colocado em manutenção, pois os elementos restantes associados conseguem construir um caminho alternativo que substitui o elemento em falta.

3.2.3-Elementos de uma subestação

Os principais elementos elétricos de uma subestação de C. A. do tipo abordado neste trabalho são os seguintes:

- transformadores de potência;
- barramentos seccionáveis ou não;
- disjuntores de alta e média tensão;
- chaves seccionadoras;
- transformadores de tensão e corrente;
- reatores;
- bancos de capacitores;
- pára-raios e
- circuitos auxiliares.

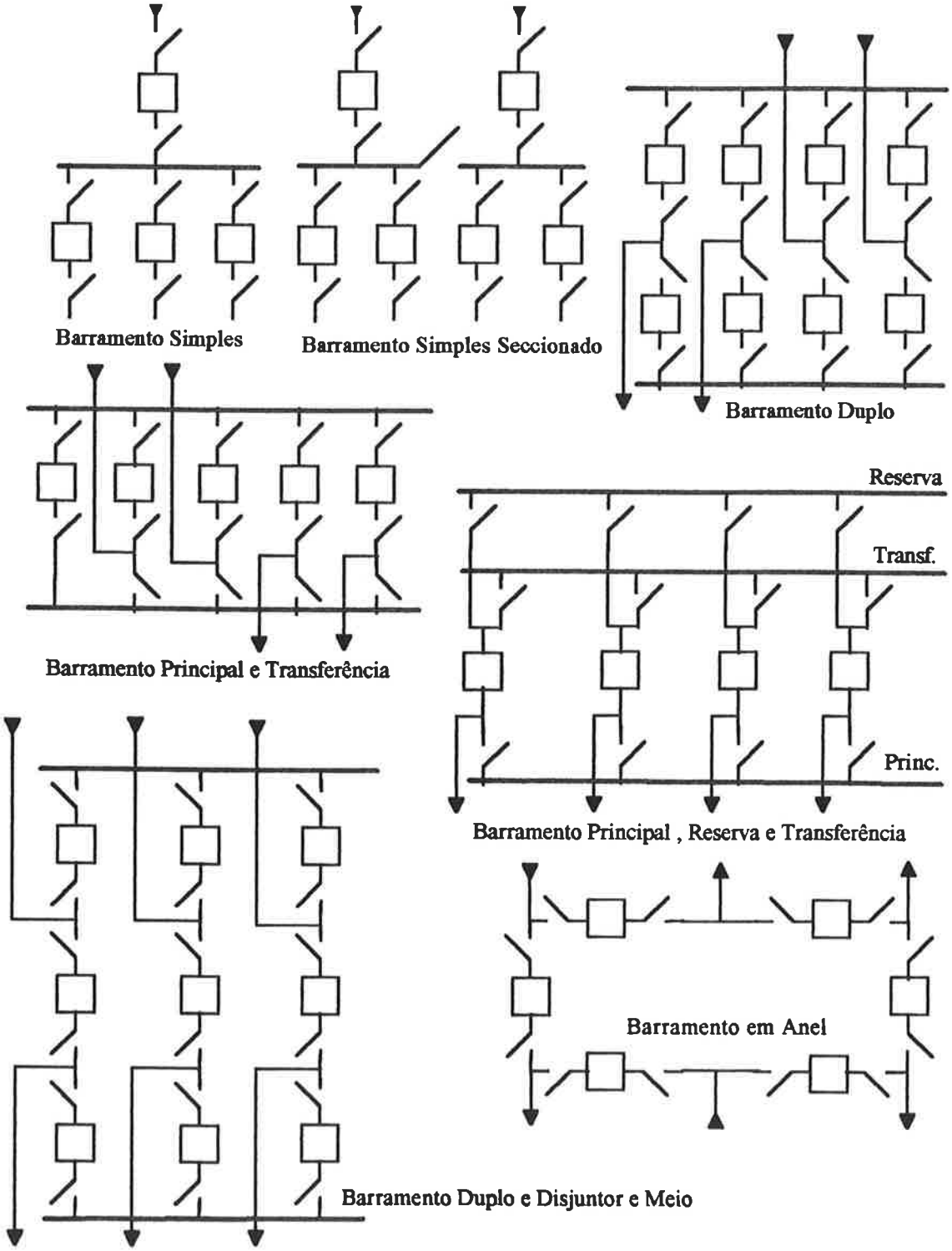

Figura 3.2 - Diagramas unifilares de esquemas possíveis de subestações

Associados a esses elementos existem outros dispositivos que alimentam o sistema de controle(painel da cabine de controle) da subestação, composto pelo sistema de supervisão e controle e o de proteção, permitindo ao operador sensoriar tensões, correntes, potências e outras grandezas elétricas eficazes ou temporais através de oscilógrafos e também o estado de elementos seccionáveis como disjuntores e chaves seccionadoras. Com estas informações, o operador deverá ser apto a analisar e tomar decisões quanto a possíveis manobras necessárias para localizar e isolar defeitos de elementos sensoriados ou ainda a realizar planos de emergência em uma situação de contingência, como uma perda de um transformador ou linha de transmissão.

O transformador, por exemplo, tem uma série de proteções que podem enviar sinais de disparo("trip") para o disjuntor e desligá-lo em uma situação de emergência ou ainda sinalizar no painel uma situação de pré-emergência como o sobreaquecimento dos enrolamentos através da imagem térmica da temperatura. Pode-se definir prioridades para os alarmes do transformador como para qualquer outro dispositivo sensoriado. Basicamente as principais proteções de um transformador de potência são:

- relé diferencial porcentual(87) com restrições de harmônicas de segunda ordem;
- relé de sobrecorrente temporizado e instântaneo de fase e de neutro(51, 50, 51-N e 50-N);
- relé de aterramento(51-GB) para ligação estrela-aterrada;
- relé Bucholz(63) ou relé de sobrepressão no óleo devido a decomposição de gases po efeito de uma sobrecarga elevada ou um curto-circuito;
- relé de sequência negativa;
- relé de subtensão;
- relé de temperatura do óleo e do enrolamento.

Os barramentos possuem um relé diferencial porcentual baseado em acopladores lineares. Já as linhas de transmissão possuem proteções baseadas em relés do tipo impedância ou de distância associados a dispositivos tipo "carrier" de comunicação, que hoje em dia pode ser feita por fibras óticas que podem estar localizadas no interior do próprio cabo pára-raio. Os

transformadores de potencial e corrente tem proteções como sensores de temperatura do óleo ou dos enrolamentos.

Diversas grandezas dos equipamentos de uma subestação podem ser monitoradas e integradas a processos de análise com o objetivo de antecipar ou evitar defeitos que possam danificar o equipamento e se propagar pelo resto da rede. A tabela a seguir mostra parametros típicos que podem ser monitorados para alguns equipamentos típicos de uma SE.

EQUIPAMENTO	PARAMETROS MONITORADOS
TRANSFORMADOR	temperatura do óleo, nível de ruído, descarga parcial, gás dissolvido no óleo, condições de operação do tap que opera sobre carga
DISJUNTORES A GÁS SF6	pressão do gás, aquecimento, número de operações, ruído e vibração, pressão do óleo e do ar dos mecanismos de operação, características de operação, corrente de operação
GIS - SUBESTAÇÃO ISOLADA A GÁS	pressão do gás, aquecimento, e temperatura, gás decomposto, descarga parcial, ruído e vibração, características de operação, pressão do óleo e do ar de mecanismos de operação
CHAVE SECCIONADORA	características de operação, aquecimento local, potência necessária para a operação, estados aberto/fechado
PÁRA-RAIO	número de operações, corrente de fuga
TRANSFORMADORES DE MEDIÇÃO	tipo imerso em óleo - descarga parcial e conteúdo de H2O no óleo tipo a seco - descarga parcial ou corrente de fuga

Tabela 3.1 - Parâmetros típicos de equipamentos que podem ser monitorados

3.2.4-Interface homem-máquina e alarmes em uma subestação

A interface homem-máquina de uma subestação permite ao operador visualizar e entrar com dados, implementar operações manuais e inicializar procedimentos de diagnóstico e manutenção. As principais operações possíveis podem ser itemizadas da seguinte maneira[60]:

- Visualização de Dados

. dia e horário;

. diagramas unifilares com dados numéricos e de status;

. alarmes;

. lista de alarmes ou resumo;

. sequência de eventos gravados;

. gravações de defeitos;

. gravações de tendências;

. visualização do "status" de dispositivos;

. visualização de calibrações de relés;

. visualização da configuração do sistema de controle, incluindo pontos fora de serviço e tabelas de rotas de sinais;

. entradas(logs);

. visualização dos pontos de controle e seus padrões.

- Entrada de Dados

. código de acesso do operador;

. mudanças nas tabelas de acesso do operador;

. mudanças nas calibrações dos relés;

. definição e alterações dos pontos de controle e seus padrões;

. limites de alarmes, cancelar alarmes, substituir valores limites;

. status de dispositivos operados manualmente;

. procura de valor, tendência das entradas de controle;

- Operações de Controle Manual

. operações de abertura de disjuntores e desconexão de chaves;

. sequência de chaveamentos;

. controle da posição do tap;

. segurança (inibição ou abilitação do controle);

. habilita ou desabilita funções de relés (proteção piloto, religamento, out-of-step, falha no disjuntor);

. configuração do controle (serviço/teste, transferência, etc);

. habilita ou desabilita funções de controle;

. seleção de controle remoto ou local;

. reconhecimento de alarmes;

. pontos de entrada/saída para serviços/testes.

- Funções de Diagnóstico e Manutenção

. visualização de dados de falhas;

. visualização de erros estatísticos;

. inicialização de testes de diagnósticos;

. habilita ou desabilita funções;

. sequência de chaveamento passo a passo;

Todos os pontos de alarmes podem ser classificados em diferentes categorias, que podem ser mostrados em telas de vídeo (alarmes instantâneos ou listas de alarmes) ou armazenados em meio magnético ou em relatórios contínuos para análises futuras ou para alimentar algum outro sistema de análise, como por exemplo um sistema especialista para auxílio à operação, localmente e/ou remotamente, grupados por suas categorias.

Os estados de alguns alarmes podem ser definidos através de contatos normalmente abertos ou normalmente fechados. Deverá haver um meio do operador ou do sistema de operação de reinicializar("reset") os alarmes quando necessário. O tempo mínimo para alarmes momentâneos é da ordem de 2 a 8 ms.

Os principais alarmes que podem ser gerados em uma subestação do tipo abordado neste trabalho são os seguintes:

- problemas em um disjuntor;
- bloqueio de um disjuntor;
- perda de tensão em uma barra;
- perda de tensão em uma linha;
- falha na tensão continua;
- falha na tensão alternada;
- problemas no gerador de emergência;
- fogo na casa de controle;

- alarmes em transformadores:

. problemas na proteção;

. fogo;

. perda de fluxo do óleo;

. temperatura elevada do óleo;

. nível baixo do óleo;

. perda de potência ;

. ponto quente ou temperatura do enrolamento;

. queda de pressão;

. detecção de gás;

. tanque de vácuo;

. carregamento excessivo;

. fora de serviço;

. problemas no comutador de tap;

. carregamento de emergência;

. perda de alimentação no sistema de ventiladores;

alarmes de um reator:

. problemas com a proteção;

. fogo;

. perda de fluxo do óleo;

. temperatura excessiva do óleo;

. nível baixo do óleo;

. ponto quente ou temperatura do enrolamento;

. queda de pressão;

. detecção de gás;

. tanque de vácuo;

. fora de serviço;

. problemas com a proteção de linhas;

- problemas com a proteção de barramento;

- problemas com a qualidade da medição;

- excesso de carregamento nas linhas;

- perdas nas linhas;
- pico de potência ativa e reativa nas linhas;
- perda de cabo guarda;
- falha no sistema "carrier";
- falha no sistema automático de controle da operação;
- tensões desbalanceadas;
- falha no sincronismo de energização;
- presença de pessoal não autorizado na área da subestação;
- atuação do gerador de emergência;
- nível do poço de dreno de óleo elevado;
- falha da bomba de eliminação de dejetos;
- problemas com os transdutores de corrente alternada.

3.3-Relacionamento operador/informação em SE

Os operadores de subestações ou os despachadores do sistema são os primeiros a tomar contacto com condições anormais e, com base nos alarmes e mensagens gerados devem tomar decisões rápidas para evitar a propagação do problema, minimizar os possíveis danos a equipamentos e garantir a qualidade do fornecimento de energia.

O aparecimento dos sistemas SCADA("Supervisory Control and Data Aquisition") na década de 60 permitiu através de representações em telas gráficas e em relatórios contínuos, a visualização das mensagens e alarmes ocorrendo em subestações ou em centros de controle de despacho. Nas décadas de 70 e 80 o número de pontos que eram supervisionados(em taxas de atualização da ordem de 2-10 segundos) por sistemas do tipo SCADA e EMS("Electric Management Systems") aumentou, permitindo um melhor domínio do que estava ocorrendo no sistema.

Hoje o número de mensagens e alarmes gerados em uma subestação é da ordem de centenas e até milhares dependendo do número de equipamentos e da complexidade da mesma. No caso de um centro de controle de despacho pode chegar a ordem de dezenas de milhares. Os

processadores de mensagens são capazes de produzir até 500 mensagens por minuto continuamente em um sistema de despacho, dificultando assim o trabalho do despachador na tomada de decisão devido a sua barreira cognitiva para a interpretação de um grande volume de informações, possivelmente a grande maioria redundante. Esta situação pode levar a uma possível tomada de decisão incorreta. Um exemplo real do número de mensagens gerados é apresentado a seguir conforme o artigo de Kirschen[61] citando dados da Hydro-Quebec:

- acima de 150 alarmes em 2 s para uma falta em um transformador;
- acima de 2000 alarmes para uma falta em uma subestção geradora sendo que os primeiros 300 alarmes são gerados durante os primeiros 5 s;
- acima de 20 alarmes por segundo durante uma tempestade;
- acima de 15000 alarmes para cada centro regional durante os primeiros 5 s de um colapso total do sistema.

A grande quantidade de dados geradas pelos sistemas do tipo SCADA/EMS é devida basicamente as seguintes razões:

- a introdução de alarmes oriundos de falhas dos equipamentos de medição como sensores, transdutores, conversores de sinais, gerando assim uma proliferação de alarmes;
- a monitoração do próprio sistema SCADA/EMS gera uma grande quantidade de alarmes apesar do operador/despachador ter como objetivo principal a operação do sistema de potência;
- a experiência com os sistemas do tipo SCADA/EMS e seu ótimo desempenho como ferramentas para a monitoração e o controle dos sistemas,fez com que se vislumbrasse a transformação de sistemas do tipo EMS em sistemas de informação para a operação(OSI-"Operation Information Systems") da mesma maneira que sistemas de processamentos de dados se transformariam em sistemas de administração de dados(MIS-"Management Information Systems")
- os sistemas podem gerar alarmes de forma muito elementar as vezes de díficil interpretação pelo operador. É necessário a interpretação destes alarmes e sua tradução em alarmes de mais alto nível para o pessoal de operação;
- quando ocorre uma perturbação em um sistema o número de alarmes cresce absurdamente e é nestas horas que os sistemas deveriam fornecer ao operador só as informações

mais importantes e com significado para que ele possa tomar decisões com menor possibilidade de erro.

O trabalho de Hein[23] cita que a experiência de vários anos indica que um número da ordem de 5% ou menos dos alarmes e grandezas como correntes e tensões registradas durante uma emergência são suficientes para que se possa identificar e classificar uma perturbação completamente.

Um dos principais problemas para a determinação de uma perturbação é a dificuldade de se determinar o seu início e o seu final. Uma ferramenta útil para a análise de uma perturbação deveria conter um módulo que separasse os alarmes conforme a sua origem, por exemplo por alimentadores, e os colocasse em ordem cronológica de geração.

Para poder auxiliar corretamente o operador, superando os problemas apontados, um sistema completo de análise de alarmes deveria conter os seguintes níveis:

- nível de sensoreamento, que controla a aquisição, a marcação de tempo, a transmissão e a identificação dos alarmes e sinais(nível mais baixo);
- nível de visualização, que seleciona, agrupa, ordena, suprime, completa e contrói relações entre os alarmes e sinais (podem ser visualizações baseada em alarmes, em alimentadores ou na rede como um todo);
- nível de reconhecimento, que modela o incidente, define a seu tipo, localização, extensão, topologia e a sua ordem cronológica;
- nível de reflexão, que faz comparações entre comportamentos esperados, baseados nos modelos definidos no nível de conhecimento, e os ocorridos, faz a verificação de fatos e regras e a detecção de irregularidades;
- nível de julgamento, que toma decisões de importância, como fornecer subsídios para a execução de reconfigurações, manutenções ou para implementar o tratamento dos alarmes propriamente dito, baseadas nas irregularidades detectadas no nível de reflexão.

Esta clara aqui a necessidade de ferramentas que auxiliem o operador a tomar decisões com um menor risco de erro. A criação de anunciadores e técnicas novas de apresentação de

mensagens mais "inteligentes" se faz necessária. O trabalho de Amelink [62] trata deste problema, apresentando sugestões de tres conceitos de processadores de alarmes, que são ferramentas de "software" agregadas a sistemas do tipo SCADA e EMS:

- estaticamente adaptativo;
- dinâmicamente adaptativo e
- baseado em inteligência artificial.

Um processador de mensagens estaticamente adaptativo deve ser desenvolvido com base no modo como as mensagens são trabalhadas e quem esta habilitado a ve-las. As mensagens tem rotas para onde são enviadas ou dispositivos em que são apresentadas, escritas ou gravadas. Elas também possuem prioridades de apresentação que podem ser classificadas da seguinte maneira:

- classe 1: alarmes que geram um aviso sonoro contínuo e com mensagens alafanuméricas em sobressalto(piscando, reverso, etc);
- classe 2 : alarmes com um simples toque sonoro e mensagens alafanuméricas sem sobressalto;
- classe 3 : alarmes que só são mostrados nos consoles e
- classe 4 : alarmes que são armazenados em arquivos para posterior análise por pessoal especializado, possivelmente para estudos estatísticos ou para a avliação da performance dos sistemas de "hardware" e "software" envolvidos.

As mensagens podem ser segmentadas gerando relatórios específicos , como por exemplo, relatórios de equipamentos que estão fora de seu estado normal, relatórios que mostram registros que ocorreram antes durante e depois de uma perturbação ou ainda relatórios específicos de alarmes vínculados a determinados equipamentos. Também pode ser gerado um relatório histórico com todas as mensagens e o instante de sua criação, permitindo assim a possibilidade de análises futuras do efeito de uma perturbação e da sua propagação.

Os processadores dinâmicamente adaptativos surgiram devido ao grande número de mensagens gerados em uma perturbação o que levou ao crescimento do processamento de mensagens em volume, tamanho e complexidade das funções. Existe um limite de processamento de mensagens por unidade de tempo que um sistema SCADA/EMS pode

manipular no ponto de vista técnico e econômico. A utilização de sistemas dinâmicos adaptativos para processamento de mensagens pode ser necessária em condições operativas do sistema que levam a um elevado número de mensagens a ser manipulado.

O processamento de prioridades através de classificação por classes de prioridade, estabelecida pelo operador ou despachador para o processador de mensagens, define como as mensagens serão manipuladas. O sistema dinâmico adaptativo durante uma perturbação desloca as ordens das classes, ou seja, as respostas para as mensagens da classe 2 são dadas para as mensagens da classe 1 e assim por diante. Desta maneira o número de mensagens supérfluas que chegam ao operador se reduz. Para se evitar a perda de mensagens classe 1 pode-se dividi-las em dois tipos uma que tem respostas tipo classe 1 e outras que tem respostas tipo classe 2. A rapidez com que o sistema de processamento de mensagens mostra por exemplo a perda de um alimentador em uma SE ou de uma linha em um sistema de potência é essencial para que o operador ou despachador possa compreeender os eventos que podem ocorrer após uma perturbação deste tipo.

Outro método trazido pelos sistemas dinâmicos adaptativos é o reconhecimento automático de alarmes, ou seja, o sistema recebe os alarmes e automaticamente os reconhece e reinicializa os campos alfanuméricos que foram acionados e ainda atualiza automaticamente a representação unifilar apresentada em um monitor de vídeo.

A redução do número de mensagens pode ser feita através de um processamento inteligente das mesmas utilizando técnicas de inteligência artificial, ou melhor de sistemas especialistas aplicados ao processamento de alarmes. A associação de um conjunto de mensagens pode ser substituída por uma única mensagem, através da utilização de árvores lógicas.

A principal dificuldade que se encontra na utilização de inteligência artificial no processamento de mensagens é a cronologia dos eventos para que se possa alimentar as árvores lógicas de eventos levando assim a uma única mensagem. Os sistemas que utilizam IA manipulam bancos de dados de conhecimento grandes e devem trabalhar com sistemas de

aquisição de dados(conhecimento) de alta velocidade, levando assim a utilização de recursos computacionais pesados e possivelmente dedicados.

CAPÍTULO 4

PROPOSTA DE UM PROTÓTIPO DE UM CONJUNTO DE SISTEMAS ESPECIALISTASPARA O AUXÍLIO NA OPERAÇÃO, MONITORIZAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SUBESTAÇÕES.

4.1-Modelo do conjunto de sistemas especialistas

4.1.1-Arquitetura do sistema

A idéia básica deste trabalho é propor um conjunto de sistemas especialistas para o auxílio a operação e a manutenção de subestações contendo os seguintes módulos:

- um sistema especialista para o tratamento de alarmes;
- um sistema especialista para a detecção de defeitos;
- um sistema especilista para a reconfiguração da subestação e
- um sistema especialista para avaliar o desempenho da manutenção.

A informação que alimentará estes sistemas, numa versão posterior, deve ser gerada por um sistema de aquisição de dados, que pode ser semi-automatizado ou totalmente automatizado. Esta informação deverá ser composta de alarmes e de medidas de grandezas importantes em alguns pontos críticos da subestação. O sistema se aquisição pode ser do tipo "SCADA" (Supervisory Control and Data Aquisition) , o que permite a aquisição dos dados e a possibilidade do controle de variáveis remotamente. Os protótipos desenvolvidos foram alimentados por arquivos , que simulam o sistema de aquisição de dados e o sistema com informações do estado topológico da SE.

O sistema possui uma arquitetura ou um fluxo de informações que pode ser descrito pela figura 4.1. Pode-se observar que existe um arquivo ou uma série de arquivos de comunicação entre os sistemas especialistas ou seja, regiões em que se pode guardar informações comuns que auxiliem no processo de inferência de cada um dos sistemas especialistas, como por exemplo a topologia da subestação, ou o estado atual dos componentes manobráveis, que podem mudar de

estado lógico(fechado ou aberto) e dos elementos não manobráveis que podem estar energizados ou não.

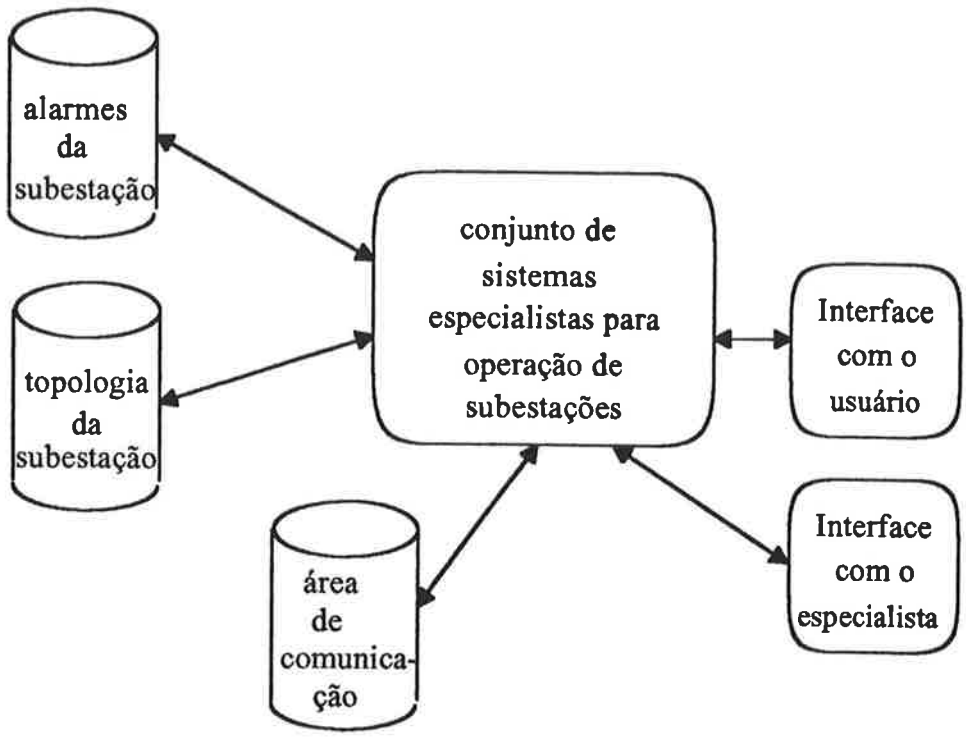

Figura 4.1 - Diagrama com o fluxo de informações do sistema proposto

4.1.2-Dados do sistema de supervisão

O sistema de supervisão pode coletar dados de grandezas de interesse em pontos estratégicos da subestação, como as tensões nas barras principais, as correntes nas linhas de alimentação e nos alimentadores que saem da subestação ou ainda o estado lógico de alguns elementos seccionáveis. Pode receber também alguns alarmes de eventos importantes na subestação como a atuação de algumas proteções , a violação de alguns limites em equipamentos

(sobrecorrentes ou sobretensões oriundas de sobrecargas ou de curtos-circuitos) e a informação de atuação ou não de elementos seccionadores.

4.1.3-Tratamento de alarmes

A modelagem para tratamento de alarmes está baseada em um arquivo de fatos contendo os alarmes gerados pelo sistema de supervisão, que podem ser de três tipos básicos:

- valores de medições de grandezas elétricas, como por exemplo a tensão em valor eficaz de uma barra ou a corrente passante em um ramo da subestação.

- a sinalização que alguma variável excedeu um limite pré-determinado, como por exemplo a corrente que passa em um transformador excedeu o limite de sobrecarga admíssivel em um determinado período de tempo.

- a sinalização da atuação de um dispositivo de proteção, por exemplo a atuação de um relé de sobrecorrente instantâneo de um alimentador de saída da subestação ou ainda a atuação do disjuntor que é disparado por este relé.

Outro componente da modelagem é o arquivo de regras que elimina os alarmes falsos, os redundantes e aqueles que associados com outros podem ser substituídos por um alarme mais geral. Como alarmes falsos pode-se citar aqueles intermitentes e aqueles que checados com outros levam a conclusão que o alarme é falso. Um exemplo simples é a geração de um alarme de disparo de um disjuntor sem que nenhum relé que acione este disjuntor tenha sido acionado, caso em que possivelmente um sinal induzido nos cabos de comunicação simulou o alarme falso do disparo do disjuntor

O resultado final do tratamento de alarmes é umas lista reduzida de alarmes que facilitará ao operador tirar conclusões em nível hierárquico mais elevado e sem alarmes repetidos e redundantes.

4.1.4 -Diagnóstico de faltas

O diagnóstico de faltas usará as informações obtidas pelo sistema de supervisão e controle e os dados de atuação de relés e de dispositivos de secccionamento como disjuntores e chaves telecomandadas manobráveis sob carga. Através de informações da topologia da subestação e das zonas de proteção associadas a cada sistema de proteção e dos dados anteriores, poderá gerar um diagnóstico de localização e tipo da provável perturbação que gerou aquele número grande de alarmes e alterou a configuração de operação estável da subestação.

Para se localizar defeitos ou causas de defeitos é muito inportante a sequência temporal dos alarmes e sua interrelação, para que se possa checar a sequência lógica de disparo de relés e suas retaguardas e de seus dispositivos de seccionamento associados.

4.1.5 - Reconfiguração da SE

O analisador de contingências deverá, através da informação da topologia da subestação após a perturbação determinar as possibilidades de socorro de sistemas que foram desenergizados, ou seja, orientar transferência de cargas entre barras da subestação, levando à reconfiguração da subestação para um estado intermediário entre o operacional a 100 % e o estado desligado da subestação. Este estado intermediário deve procurar atender ao máximo de capacidade possível da SE naquela situação, respeitando um critério de sequência prioritária de alimentação de consumidores ou um critério de sequência de desligamento de cargas, que pode ser implementado em um sistema automático de desligamento e religamento.

4.1.6-Análise da manutenção

A análise da manutenção será baseada na atualização continuada de um índice de mérito operativo que é calculado em função dos índices de confiabilidade de cada componente da subestação e dos índices de continuidade de fornecimento. Estes índices de continuidade serão calculados considerando todas as perturbações que ocasionem o desligamento de parte da

subestação e resultem em corte de fornecimento de energia aos consumidores. Considerando-se índices de referência como meta a ser atingida, pode-se identificar os "ponto fracos" da SE e estabelecer alterações no processo e no período de manutenção dos equipamentos da subestação visando melhorar os índices de mérito de cada equipamento ou da subestação como um todo.

4.1.7-Comunicação entre os sistemas especialistas

A comunicação entre os sistemas especialistas será feita através de arquivos de comunicação que auxilirão na tarefa de se atingir o objetivo de cada um deles. Cada sistema especialista pode gerar, ao atingir seu objetivo, uma série de dados que podem servir como fatos novos aos outros sistemas especialistas.

4.2 -A Escolha da linguagem de desenvolvimento

4.2.1-Linguagens e ferramentas de desenvolvimento

Os sistemas especialistas podem ser desenvolvidos em linguagens declarativas como o PROLOG, LISP e também em linguagens procedurais como o FORTRAN, Pascal e o C mas existem ambientes de desenvolvimento de sistemas especialistas conhecidos como "shells". Os principais sistemas dedicados("shells") para o desenvolvimento de sistemas especialistas são os seguintes:

- RuleMaster, EXSYS e INSIGHT para pequenos sistemas(na faixa de menos de 400 regras), podendo ser processados em computadores pessoais(PC)
- OPS5, KES eo EXPERT para mais de 500 regras e um único paradigma de consulta, podendo ser processados em computadores grandes ou em máquinas LISP
- ART, KEE e LOOPS para mais de 500 regras e com vários paradigmas de consulta diferentes, podendo ser processados também em computadores grandes ou em máquinas LISP

O LISP foi criado em 1958 por John McCarthy do MIT, portanto é contemporâneo do FORTRAN. Suas características básicas são a utilização de memória em larga escala e a baixa velocidade, necessitando para melhorar seu desempenho, a utilização de máquinas LISP(XEROX, SYMBOLICS e outras) que tem um custo muito elevado, o que inviabiliza a sua utilização prática. A linguagem é voltada para processamento simbólico de listas e os principais elementos da linguagem LISP são os átomos, listas e procedimentos. As principais implementações são o MacLISP, CommonLISP, μLISP e InterLISP.

O PROLOG foi criado pelo francês Alain Colmerauer em 1973. Ela é uma linguagem voltada para o processamento simbólico e é baseada em fatos e regras, sendo que estas podem ser escritas de forma direta(linguagem natural) ou indireta(na sintaxe da implementação).

O artigo de S. V. Vadari et alli[63] trata da comparação do uso de linguagens com o uso de "shell's" para o desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados à sistemas de potência. O autor apresenta a seguinte tabela de comparação entre as linguagens e os "shell's":

CARACTERÍSTICA	"SHELL"	LINGUAGENS
Representação de Conhecimento	Geralmente fixa, pode suportar um ou mais representações	Pode ser desenvolvida para as necessidades da aplicação
Banco de Dados	Geralmente possui um banco de dados	Pode acessar qualquer banco de dados comercial a medida que ele permita
Máquina de Inferência	Geralmente possui uma ou mais fixas	Deve ser desenvolvida para o problema específico
Métodos de Busca	Fixo	Flexivel, pode ser escrito conforme as necessidades
Interface Homem-Máquina e Gráfica	Geralmente possuem e é fácil de usar	É necessário que seja criada
Editor	Possue um editor interno adaptado ao desenvolvimento	É em geral necessário usar um editor externo

Tabela 4.1 - Comparações entre as linguagens e os shells de desenvolvimento de sistemas especialistas

4.2.2-Porque o PROLOG ?

No trabalho aqui apresentado, foi adotado o PROLOG, pois além de ser uma linguagem mais apropriada para o desenvolvimento de sistemas especialistas em confronto com as linguagens procedurais, possui vantagens que permitem uma rápida prototipação para testar a base de conhecimento montada. Em relação ao LISP optou-se pelo PROLOG, pois o LISP possui uma sintaxe mais complexa tornando o desenvolvimento mais lento. A opção por uma das duas linguagens é também uma questão de empatia e de facilidade de se conseguir aprendê-la, principalmente para nós que apreendemos computação sempre através de linguagens procedurais como FORTRAN, Pascal, C, BASIC e outras. A necessidade de melhoria na performance do sistema especialista, no caso da integração do sistema desenvolvido com um sistema de supervisão e controle ou seja o desenvolvimento de um sistema comercial, pode levar a reescrita do sistema especialista em uma linguagem procedural de maior velocidade ou em um ambiente de desenvolvimento de sistemas especialistas.

Para que se possa comparar melhor o PROLOG em relação as linguagens procedurais pode-se utilizar a tabela a seguir que apresenta características básicas de cada uma [64]:

PROLOG	LINGUAGENS PROCEDURAIS
memória não eficiente	memória eficiente
orientação por dados	orientação por procedimentos
processos heurísticos	processos algoritmicos
suporte a estrutura de recursão e dados complexos	suporte limitada a estruturas de dados
suporta processamento simbólico	não suporta processamento simbólico

Tabela 4.2 - Características básicas do PROLOG e das linguagens ditas procedurais

O PROLOG possui várias implementações tanto para computadores de grande porte como para computadores pessoais, pode-se citar entre elas as seguintes:

- micro-PROLOG
- MPROLOG

- ADA PROLOG
- TURBO-PROLOG
- PDC-PROLOG(antigo TURBO-PROLOG)

4.2.3 -O TURBO-PROLOG

O TURBO-PROLOG foi adotado devido basicamente a ser uma linguagem que possui um ambiente integrado de desenvolvimento, ou seja, um editor, um gerenciador de arquivos e ferramentas para a compilação e execução do programa desenvolvido.

A tabela a seguir mostra algumas características que diferenciam o PROLOG padrão do TURBO-PROLOG [64].

TURBO-PROLOG	PROLOG PADRÃO
não tem memória virtual	pode ter memória virtual
predicados devem ser declarados	nenhuma declaração de variável
não pode se alterar o programa dinâmicamente	pode-se alterar chamando um predicado
manipulação dinâmica de fatos e não de regras	manipulação dinâmica de fatos e não de regras
listas de objetos de mesmo tipo	listas de múltiplos tipos
execução rápida	execução pode ser lenta
suportam gráficos, janelas, etc	alguns tem recursos (extensões)
editor interativo	podem não possuir editor

Tabela 4.3 - Comparações entre o TURBO-PROLOG e o PROLOG padrão

Todo programa em TURBO-PROLOG deve possuir as seguintes estruturas básicas:

-domains

-predicates

-clauses

A estrutura "domains" é aquela em que se declara o tipo das variáveis utilizadas para declarar as regras e fatos. A estrutura "predicates" é aquela em que se declara os predicados com seus argumentos declarados na etapa anterior. Finalmente a estrutura "clauses" é aquela em que se declaram os fatos e regras sendo os fatos um predicado e as regras um conjunto de relações entre predicados ou fatos que podem ser falsos ou verdadeiros.

Pode-se ter ainda a inclusão de outros programas ou bibliotecas de predicados através do comando "include" e também pode se ter um comando "goal"(meta) que define o objetivo do sistema a ser alcançado, que pode ser por exemplo um conjunto de predicados. Pode-se trabalhar com arquivos e com bancos de dados de fatos ("database"), que podem ser gerados por exemplo por um sistema de supervisão e controle.

Pode-se citar como duas funções importantes do TURBO-PROLOG a unificação e a recursão. O processo pelo qual o PROLOG tenta combinar um termo contra os fatos ou cabeças de outras regras em uma tentativa de provar um objetivo é chamado de unificação. A unificação é um processo de combinação de formas, que exige as seguintes condições:

- mesmo número de argumentos e posição nos predicados
- argumentos do mesmo tipo
- todos os subtermos devem ser unificados uns com os outros

Uma variável livre fica ligada quando unificada com qualquer termo. A recursão consiste em um predicado que é capaz de chamar uma cópia dele mesmo, logicamente deve existir uma predicado que termine a sequência de recursões.

Outro recurso importante do TURBO-PROLOG é o corte, que permite que um bloco recue em uma condição especificada em uma árvore de opções.

O TURBO-PROLOG permite a interface com outras linguagens, como o TURBO-C, TURBO-BASIC e TURBO-PASCAL. Com esse recurso pode-se implementar rotinas procedurais fora do PROLOG e utilizar os resultados no processamento simbólico.

O PROLOG começa com um objetivo a comprovar("goal"). Em seguida é feita uma tentativa de se unificar este objetivo a uma ou mais conclusões. Se mais de uma conclusão for unificada com este objetivo, deve haver algum algoritmo que defina que regra aceitar (a primeira). Finalmente , se a regra tiver sucesso, a conclusão é adicionada a memória de trabalho e o ciclo é repetido. Se a regra falhar, o PROLOG recua e tenta unificar com uma outra premissa. Isto é basicamente um algoritmo fixo interno à linguagem PROLOG. A figura 4.2 a seguir ilustra o fluxo de execução do PROLOG.

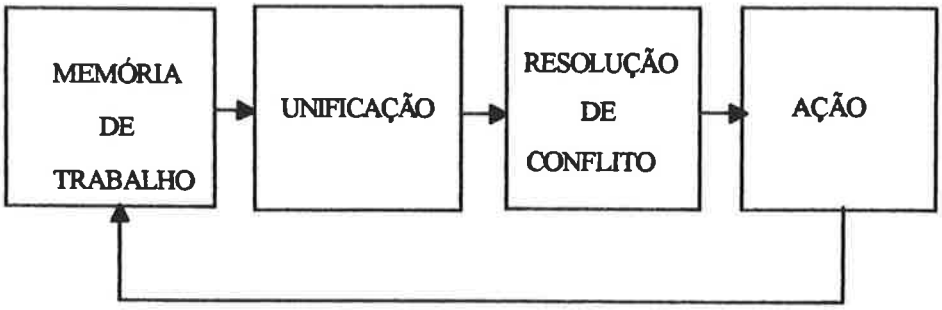

Figura 4.2 - Fluxo de execução em um programa em TURBO-PROLOG.

O instrumento de inferência básico do TURBO-PROLOG segue o seguinte ciclo:

- combinação/unificação: identifica as cláusulas para o teste
- seleção: resolve quaisquer conflitos se forem combinadas múltiplas cláusulas
- disparo: dispara a regra; isto é, aceita-a como uma que terá atuação
- ação: inclui a conclusão à memória de trabalho ou ativa uma operação externa

O TURBO-PROLOG trabalha bem com o encadeamento ao contrário("backward chaining"), pois é basicamente o processo de fluxo de execução que ele utiliza, ou seja, uma conclusão é assumida e se trabalha para trás tentando prová-la. Este é um método de inferência

que requer um número de dados iniciais grande e chega a um número pequeno de conclusões. Pode-se dizer que é o melhor método para sistemas de diagnóstico.

Há também a possibilidade de se trabalhar com encadeamento para frente("forward chaining"), mas é necessária a construção do mecanismo de inferência. Este tipo de encadeamento é mais voltado para aplicações de projeto e planejamento, onde o número de objetivos é grande e o de dados de entrada é pequeno.

Para o desenvolvimento dos programas em TURBO-PROLOG as referências [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70] e [71] foram muito importantes, pois trazem alguns predicados já desenvolvidos e testados.

4.3-A SE utilizada

4.3.1-Unifilar

A subestação utilizada é conectada a duas linhas de transmissão com a possibilidade de transferência automática no caso da queda da linha principal.

Ela possui dois transformadores e um barramento de transferência na baixa tensão. O diagrama unifilar da subestação adotada está desenhado na figura 4.3 a seguir:

4.3.2-Modelo da topologia da SE

Os elementos de seccionamento e de proteção como chaves seccionadoras e disjuntores respectivamente podem assumir dois estados lógicos, ou seja, fechados e abertos. Já os elementos não seccionáveis (transformadores, linha, alimentadores, barramnetos e outros) podem assumir os estados energizados(corrente passando) ou desenergizados. Há ainda a possibilidade dos elementos estarem em manutenção.

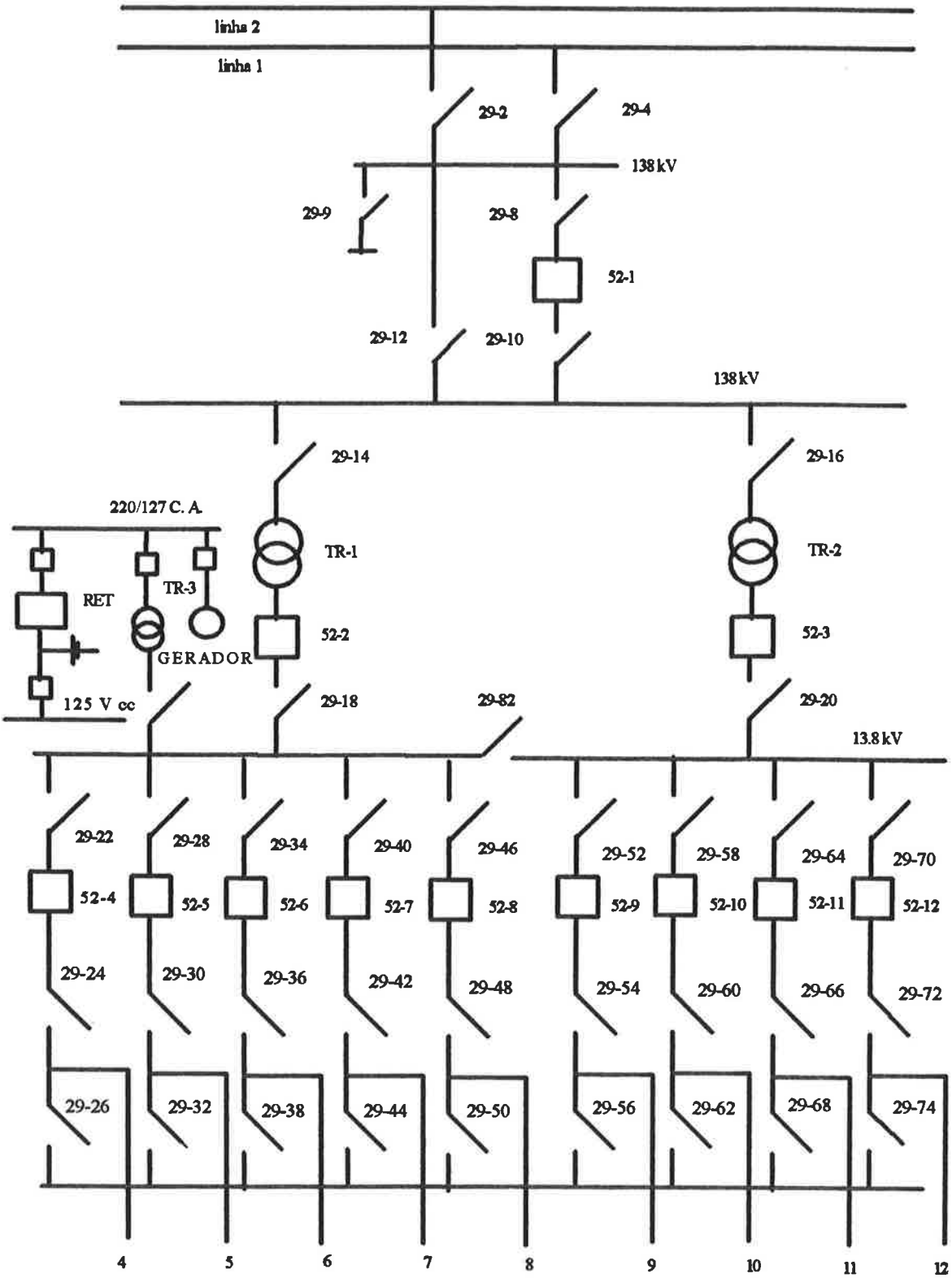

Figura 4.3 - Diagrama unifilar da subestação utilizada

Na representação gráfica os estados desenergizado e aberto(chaves e disjuntores) serão representados pelo símbolo do elemento desenhado em cor verde, já no estado energizado e fechado(chaves e disjuntores) o equipamento será desenhado em cor vermelha.

Em uma situação em que se liga ou desliga um disjuntor que alimenta determinado circuito a propagação do estado deve ser aplicada a todos os elementos do circuito.

A conectividade dos elementos, que pode ser dada por uma tabela que represente a árvore de conexões da rede e de seus elementos, deve ser a principal ferramenta para se detectar a propagação do estado de um circuito a juzante, quando se muda o estado de um de seus elementos de seccionamento e/ou proteção. A árvore de conexão dos elementos da rede também servirá para a análise e localização de defeitos, a análise de reconfiguração e também para a análise do desempenho da manutenção através do índices de mérito operativo.

A representação por meio de grafos é a mais apropriada para uma subestação e seus componentes, em um contexto em que se quer analisar a propagação de energia. A figura 4.4 a seguir mostra um diagrama unifilar típico de um pedaço de uma subestação e o diagrama equivalente em arcos e nós de um grafo.

4.3.3-Modelo hierárquico da SE

O modelo hierárquico será utilizado para facilitar o tratamento de alarmes a nível de equipamentos, circuitos específicos tais como "bays" de entrada, de transformação, compensação de reativos(quando houver) e de saída(alimentadores). Desta maneira pode-se fazer um tratamento de alarmes a nível hierárquico diferente, gerando um número de alternativas menor.

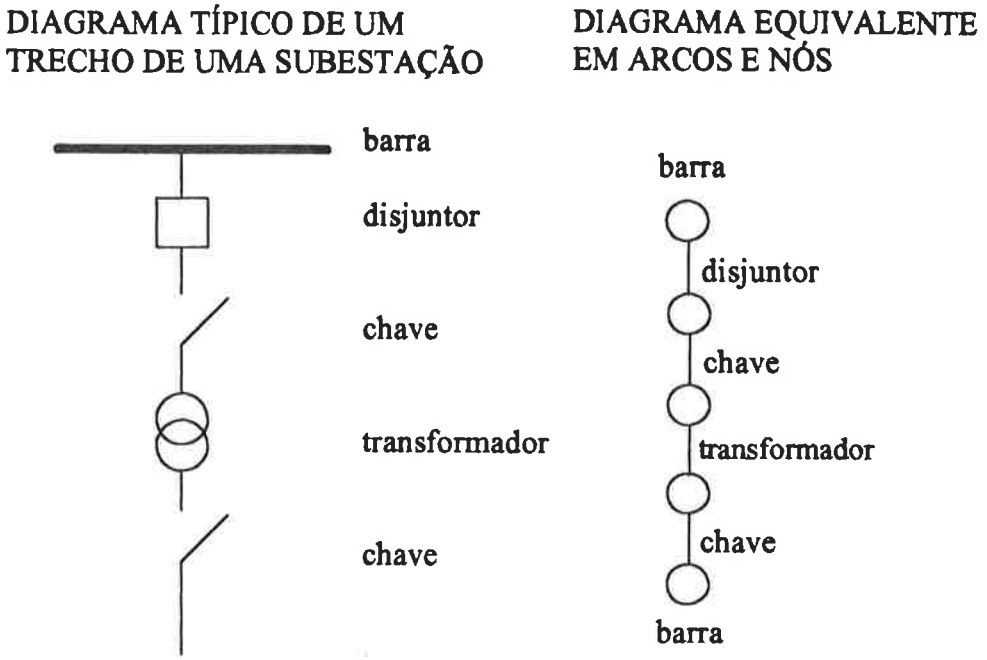

Figura 4.4 - Diagramas unifilar e equivalente em arcos e nós de um trecho de uma subestação

A hierarquia de funções da proteção também é importante para a localização e análise de defeitos. No caso do sistema de análise de reconfiguração o tratamento hierárquico de informações facilita a análise da possibilidade de energização de trechos em níveis diferentes. Finalmente para o sistema de análise do desempenho da manutenção o tratamento hierárquico também facilita o cálculo dos índices de mérito operativo.

O tratamento hierárquico está associado a sistemas de supervisão e controle do tipo SDCD(Sistema Digital de Controle Distribuído), que considera processamento de parte das funções em estações remotas próximas aos sistemas ou equipamentos sensoriados.

4.3.4-Modelo dos alarmes existentes

O sistema de supervisão da subestação, adotada para o desenvolvimento dos protótipos dos sistemas especialistas propostos, possui 2 estações remotas com 16 placas cada uma totalizando uma lista de 83 alarmes associada a elementos da subestação(pontos digitais), 12

pontos de comandos de disjuntores e 17 pontos de medidas analógicas(tensões, correntes, etc). As tabelas a seguir mostram os tipos de mensagens de alarme com os estados possíveis, os disjuntores que são comandados e os sinais analógicos medidos.

O artigo de Cugnasca, Saraiva e Massola[72] apresenta mais detalhes sobre o Sistema de Supervisão e Controle de Subestações(SSCS) desenvolvido pela FDTE(Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia) para estações semelhantes a esta. Este artigo apresenta as características técnicas das estações remotas e central, a arquitetura do sistema, suas funções e a interface utilizada.

pontos digitais	
mensagens de alarme	ocorrências possíveis
disjuntor 52-1	ligou/desligou
disjuntor 52-3	ligou/desligou
disjuntor 52-4	ligou/desligou
disjuntor 52-6	ligou/desligou
disjuntor 52-12	ligou/desligou
proteção de sobrecorr. CUB 52-7	atuou/desatuou
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-9	atuou/desatuou
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-10	atuou/desatuou
proteção de sobrecorr. CUB 52-5	atuou/desatuou
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-6	atuou/desatuou
proteção de sobrecorr. CUB 52-8	atuou/desatuou
proteção de sobrecorr. CUB 52-11	atuou/desatuou
rele de sobrecorr. neutro BT TR-1	atuou/desatuou
proteção sobrecorrente AT TR-1	atuou/desatuou
relé diferencial TR-1	atuou/desatuou
disjuntor 52-9	ligou/desligou
disjuntor 52-11	ligou/desligou
proteção de sobrecorr. CUB 52-10	atuou/desatuou
ERAC freq. trip	atuou/desatuou
ventilação forçada TR-1	atuou/desatuou
rele de gás 1"/2" grau TR-1	atuou/desatuou
nível de óleo baixo TR-1	atuou/desatuou
temp. óleo 1"/2" grau TR-1	atuou/desatuou
temp. enrl. 1"/2" grau TR-1	atuou/desatuou
ventilação TR-1	defeito/volta normal
relé de bloqueio TR-1	atuou/desatuou
transferência de linha incompleta	atuou/desatuou
retificador	defeito/volta normal
subtensão comando 52-1- alarme(DDD)	atuou/desatuou
subtensão comando 52-1- trip(DDD)	atuou/desatuou
C. C. CUB 52-2 e 52-3	faltou/restaurou
C. C. alimentadores 13.8 kV	faltou/restaurou
religamento CUB 52-9	bloqueou/desbloqueou

religamento CUB 52-9	bloqueou/desbloqueou
religamento CUB 52-5	bloqueou/desbloqueou
religamento CUB 52-8	bloqueou/desbloqueou
religamento CUB 52-11	bloqueou/desbloqueou
seccionador 29-2	fechou/abriu
relé de gás 1"/2" grau TR-2	atuou/desatuou
nível de óleo baixo TR-2	atuou/desatuou
temp. óleo 1"/2" grau TR-2	atuou/desatuou
temp. enrl. 1"/2" grau TR-2	atuou/desatuou
ventilação TR-2	defeito/volta normal
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-5	atuou/desatuou
proteção sobrecorrente CUB 52-6	atuou/desatuou
relé sobrecorr. neutro BT TR-2	atuou/desatuou
proteção sobrecorrente AT TR-2	atuou/desatuou
relé diferencial TR-2	atuou/desatuou
disjuntor 52-2	ligou/desligou
disjuntor 52-7	ligou/desligou
disjuntor 52-10	ligou/desligou
disjuntor 52-5	ligou/desligou
disjuntor 52-8	ligou/desligou
proteção sobrecorrente CUB 52-4	atuou/desatuou
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-7	atuou/desatuou
proteção sobrecorrente CUB 52-9	atuou/desatuou
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-8	atuou/desatuou
proteção sobrecorrente CUB 52-12	atuou/desatuou
proteção sobrecorrente TR 33 kV	atuou/desatuou
relé sobrecorr. alta imped. CUB 52-11	atuou/desatuou
ventilação forçada TR-2	atuou/desatuou
relé de bloqueio TR-2	atuou/desatuou
transferência de linha bloqueada	atuou/desatuou
porta acesso	abriu/fechou
religamento CUB 52-4	bloqueou/desbloqueou
religamento CUB 52-7	bloqueou/desbloqueou
relé de pressão do comutador TR-1	atuou/desatuou
comutador TR-1	bloqueou/desbloqueou

seccionador 29-4	fechou/abriu
ERAC freq partida	atuou/desatuou
ERAC 1" a 4" estágios	atuou/desatuou
C. C. motor secc. 138 kV	faltou/restaurou
porta cubículo	abriu/fechou
serviço auxiliar C. A.	faltou/restaurou
religamento CUB 52-10	bloqueou/desbloqueou
religamento CUB 52-6	bloqueou/desbloqueou
religamento CUB 52-12	bloqueou/desbloqueou
relé de pressão do comutador TR-2	atuou/desatuou
comutador TR-2	bloqueou/desbloqueou
transf. automática linha	atuou/desatuou
válvula segurança TR-1	atuou/desatuou
válvula segurança TR-2	atuou/desatuou
defeitos internos disj. 52-1	atuou/desatuou
potencial DDD	faltou/restaurou

Tabela 4.4 - Pontos digitais e os alarmes respectivos da subestação adotada

pontos de comando
disjuntor 52-2
disjuntor 52-10
disjuntor 52-5
disjuntor 52-8
disjuntor 52-1
disjuntor 52-3
disjuntor 52-7
disjuntor 52-6
disjuntor 52-12
disjuntor 52-4
disjuntor 52-9
disjuntor 52-11

Tabela 4.5 - Pontos de comando da subestação adotada

pontos analógicos			
nome do ponto	unidade	mínimo	máximo
tensão LT1	kV	0	168
corrente fase B CUB 52-7	A	0	600
corrente fase B CUB 52-9	A	0	600
corrente fase B CUB 52-5	A	0	600
corrente fase B CUB 52-11	A	0	600
corrente TRAFO TR-1	A	0	1500
corrente TRAFO TR-2	A	0	1500
corrente fase B CUB 52-10	A	0	600
corrente fase B CUB 52-8	A	0	600
pot. ativa CUB 52-2	kW	0	36
pot. ativa CUB 52-3	kW	0	36
tensão fase B CUB 52-3	kV	0	168
corrente fase B CUB 52-6	A	0	600
corrente fase B CUB 52-12	A	0	600
tensão LT-2	kV	0	168
tensão fase B CUB 52-2	kV	0	16.8
corrente fase B CUB 52-4	A	0	400

Tabela 4.6 - Pontos analógicos da subestação adotada

4.3.5-Modelo de relacionamento dos alarmes e dos equipamentos

O modelo que permitirá gerar uma redução no número de alarmes eliminando os falsos e os redundantes é baseado na associação dos alarmes com seus respectivos equipamentos de supervisão(transformadores, linhas, barras, alimentadores, etc) e de seccionamento(disjuntores, chaves, etc) e ainda do intertravamento entre os dispositivos.

A subestação estudada tem 13 disjuntores(um na entrada de 138 kV, dois nos transformadores e 10 para os alimentadores, sendo que um dos alimentadores é para expansão futura, ou seja, não existem alarmes associados a ele), 2 transformadores, um retificador para serviço auxiliar com um conjunto de baterias, um grupo moto-gerador, um sistema de transferência automática de linha, um sistema de desligamento e religamento em estágios por queda de frequência(ERAQ) dos alimentadores. Cabe salientar que as barras não possuem proteção diferencial neste caso.

Para os dois transformadores tem-se os seguintes alarmes e pontos analógicos(atualização a cada 5 s) associados:

TR-1

- relé diferencial TR-1
- disjuntor 52-2
- relé de pressão do comutador TR-1
- comutador TR-1
- ventilação forçada TR-1
- relé de gás 1"/2" grau TR-1
- nível de óleo baixo TR-1
- temperatura óleo 1"/2" grau TR-1
- temperatura enrolamento 1"/2" grau TR-1
- ventilação TR-1
- relé de bloqueio TR-1

- relé de sobrecorrente de neutro na BT TR-1
- proteção de sobrecorrente AT TR-1
- corrente
- potência ativa CUB 52-2
- tensão fase B CUB 52-2

TR-2

- relé diferencial TR-2
- disjuntor 52-3
- relé de pressão do comutador TR-2
- comutador TR-2
- ventilação forçada TR-2
- relé de gás 1"/2" grau TR-2
- nível de óleo baixo TR-2
- temperatura óleo 1"/2" grau TR-2
- temperatura enrolamento 1"/2" grau TR-2
- ventilação TR-2
- relé de bloqueio TR-2
- relé de sobrecorrente de neutro na BT TR-2
- proteção de sobrecorrente AT TR-2
- corrente
- potência ativa CUB 52-3
- tensão fase B CUB 52-3

Existe ainda um alarme comum associado aos dois transformadores:

- C. C. nos cúbiculos 52-2 e 52-3

Na entrada de 138 kV tem-se os seguintes alarmes:

- disjuntor 52-1
- defeitos no disjuntor 52-1
- transferência de linha incompleta
- transferência de linha bloqueada
- subtensão comando 52-1 - alarme(DDD)
- subtensão comando 52-1 - trip (DDD)
- potencial DDD
- C. C. motor da seccionadora de 138 kV
- seccionadora 29-2
- seccionadora 29-4
- tensão na LT-1
- tensão na LT-2

Para os alimentadores tem-se os seguintes alarmes associados:

ALIMENTADOR 4 (SISTEMA DE 33 kV)

- disjuntor 52-4
- proteção de sobrecorrente CUB 52-4
- proteção de sobrecorrente TR 33 kV
- religamento CUB 52-4
- corrente fase B CUB 52-4

ALIMENTADOR 5

- disjuntor 52-5
- proteção de sobrecorrente CUB 52-5
- religamento CUB 52-5
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-5
- corrente fase B CUB 52-5

ALIMENTADOR 6

- disjuntor 52-6
- proteção de sobrecorrente CUB 52-6
- religamento CUB 52-6
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-6
- corrente fase B CUB 52-6

ALIMENTADOR 7

- disjuntor 52-7
- proteção de sobrecorrente CUB 52-7
- religamento CUB 52-7
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-7
- corrente fase B CUB 52-7

ALIMENTADOR 8

- disjuntor 52-8
- proteção de sobrecorrente CUB 52-8
- religamento CUB 52-8
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-8
- corrente fase B CUB 52-8

ALIMENTADOR 9

- disjuntor 52-9
- proteção de sobrecorrente CUB 52-9
- religamento CUB 52-9
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-9
- corrente fase B CUB 52-9

ALIMENTADOR 10

- disjuntor 52-10
- proteção de sobrecorrente CUB 52-10

- religamento CUB 52-10
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-10
- corrente fase B CUB 52-10

ALIMENTADOR 11

- disjuntor 52-11
- proteção de sobrecorrente CUB 52-11
- religamento CUB 52-11
- relé de sobrecorrente alta impedância CUB 52-11
- corrente fase B CUB 52-11

ALIMENTADOR 12

- disjuntor 52-12
- proteção de sobrecorrente CUB 52-12
- religamento CUB 52-12
- corrente fase B CUB 52-12

Existem ainda alguns alarmes relacionados com o sistema de serviço auxiliar:

- retificador
- C.C. alimentadores de 13.8 kV
- serviço auxiliar de C. A.

Finalmente existem alarmes relacionados com o acesso a portas e cubículos:

- porta acesso
- porta cubículo

4.3.6- Detalhes operacionais da SE

Uma manobra importante que é realizada na SE é a da liberação de um alimentador com transferência de carga para outro alimentador através da barra de transferência de 13.8 kV. As manobras para a liberação são as seguintes:

- bloquear as proteções de sobrecorrente de neutro, relés de religamento e transferir a proteção de neutro utilizando a(s) chave(s) de transferência;
- fechar as duas seccionadoras da barra de transferência dos alimentadores que serão interligados;
- desbloquear as proteções de sobrecorrente de neutro, relés de religamento e retornar a proteção de neutro dos alimentadores;
- desligar o disjuntor a ser liberado;
- abrir as seccionadoras do disjuntor a ser liberado.

As manobras necessárias para o restabelecimento são as seguintes:

- fechar as chaves seccionadoras de isolação do disjuntor liberado;
- ligar o disjuntor que estava liberado;
- bloquear as proteções de sobrecorrente de neutro, relés de religamento automático e transferir a proteção de neutro utilizando a(s) chave(s) de transferência;
- abrir as duas seccionadoras da barra de transferência de ambos os alimentadores envolvidos;
- desbloquear as proteções de sobrecorrente de neutro, relés de religamento e retornar a proteção de neutro dos alimentadores.

O documento [66] da empresa, que forneceu os dados da subestação, apresenta um conjunto de necessidades básicas e critérios operativos para a automação de uma SE em derivação. A seguir procurou-se descrever resumidamente alguns destes critérios, que vão afetar as regras para tratamento de alarmes, localização de defeitos e reconfiguração da SE em análise.

A TAL na falta de tensão na SE deverá transferir a mesma para o outro circuito num tempo ajustável entre 40 e 60 s. Se a transferência falhar e a tensão voltar no circuito original de alimentação o sistema deverá retornar a SE para este circuito. Se a tensão de alimentação dos dois circuitos faltar por mais de 120 s o sistema abrirá o disjuntor da alta tensão e todos os disjuntores dos alimentadores de modo que o COD possa remanejar as cargas destas subestações para as vizinhas. No caso de retorno da tensão das linhas, o sistema deverá reenergizar a SE e religar os alimentadores que não foram transferidos pelo COD, já o retorno dos alimentadores transferidos ficarão para uma análise posterior.

Para a atuação da chave de aterramento rápido está prevista apenas a sinalização. Não haverá automatismo para o restabelecimento da subestação quando da atuação da mesma.

As proteções que atuam sobre a chave de bloqueio dos transformadores levam o sistema a isolar o transformador com defeito e religar o outro transformador alimentando todas as cargas possíveis da subestação. O sistema de supervisão deverá enviar alarme para a equipe de manutenção.

As proteções que não atuam sobre a chave de bloqueio do transformador levam o sistema a executar a tentativa de religamento. Se o religamento não tiver sucesso o transformador deverá permanecer isolado e o outro deverá ser restabelecido e alimentar todas as cargas possíveis da SE. O sistema deverá enviar alarme para a equipe de manutenção.

O sistema de regulação deverá ser capaz de regular a tensão do lado de baixa com os transformadores em paralelo e também na condição individual. Os níveis de tensão, corrente e faixas operativas deverão ser ajustáveis e serão definidos de acordo com as necessidades de operação. Deverá ser previsto dispositivo limitador para tensões máximas e mínimas.

O sistema deverá adquirir os valores de corrente, temperatura do óleo, enrolamento e ambiente e comparar com limites pré-estabelecidos. Quando os limites forem ultrapassados, o sistema deverá desligar alimentadores pré-selecionados de maneira a manter o transformador sem

ultrapassar as máximas temperaturas do óleo e do enrolamento. A medida que a temperatura cair o sistema deverá religar os alimentadores na ordem inversa. Quando ocorrer desligamento de alimentadores devido ao controle da temperatura deverá ser enviado um alarme para a equipe de manutenção.

Quando da abertura dos alimentadores por atuação da proteção deverão ser efetuadas duas tentativas de religamento automáticas, sendo a primeira instantânea e a segunda temporizada. Quando da abertura simultânea de um disjuntor de alimentador e dos disjuntores da baixa tensão dos transformadores, o sistema de controle deverá abrir a chave seccionadora de barramento e efetuar o religamento dos disjuntores gerais da baixa tensão. Caso tenha sucesso nesta operação , o sistema deverá fazer mais uma tentativa para restabelecer o alimentador. Caso não tenha sucesso no restabelecimento do alimentador, deverá religar o disjuntor geral da baixa tensão e enviar alarme a equipe de manutenção.

Os alarmes remotos são classificados em três níveis de severidade:

Nível 1:

- portas e janelas;
- atuação da chave de aterramento

Nível 2:

- qualquer disjuntor aberto;
- falha no comando do disjuntor;
- falha na câmara de extinção de arco do disjuntor;
- atuação da chave de bloqueio;
- falta de corrente continua e baixa tensão corrente contínua;
- falta serviço auxiliar de corrente alternada

Nível 3

- temperatura do óleo do transformador;
- temperatura dos enrolamentos do transformador;

- nível de óleo do transformador;
- nível de óleo do comutador;
- sinalização relé de gás - 1° grau;
- nível máximo de tensão;
- falha no inversor;
- falha na ventilação dos transformadores.

O gerador de emergência deve entrar em operação automáticamente assim que o transformador de serviço auxiliar sair de operação. O nível de tensão do sistema de baterias e a operação do inversor deverão ser supervisionados. Qualquer anomalia ou deficiência do serviço auxiliar, que coloquem em risco a continuidade de serviço do sistema, deve ser telesinalizada para a equipe de manutenção.

Deve-se salientar que nem todas estas recomendações se aplicam a subestação utilizada no desenvolvimneto dos protótipos dos sistemas especialistas.

CAPÍTULO 5

A IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS ESPECIALISTAS PROPOSTOS

5.1-As bases de conhecimento utilizadas

O sistemas foram desenvolvidos para a subestação do tipo derivação da CESP, descrita anteriormente. Como foi visto ela possui dois transformadores, duas possibilidades de alimentação com um sistema de transferência automática de linhas (TAL), nove alimentadores e um sistema de emergência baseado em um grupo moto-gerador diesel mais um grupo de baterias.

As bases de conhecimento utilizadas no protótipo foram levantadas através de coletas de dados junto ao pessoal da operação da referida empresa concessionária. Este é um procedimento fundamental no desenvolvimento de sistemas especialistas : a coleta e organização da informação e experiência especializadas. Os principais tipos de dados e informações utilizados foram:

- diagramas unifilares com dados da proteção,
- diagramas sequenciais;
- calibração dos relés;
- listas de alarmes,
- listas com pontos de aquisição de sinais analógicos,
- listas de equipamentos com comando remoto,
- normas de procedimentos operacionais.

É importante ressaltar que todas estas referências foram analizadas e discutidas com o pessoal da empresa, de modo a coletar toda a experiência e prática associadas às mesmas. Também foi feita uma visita a SE e ao centro operacional da distribuição da cidade, a qual pertence a SE; lá foi gravada uma fita de vídeo mostrando os vários estados de automação

das subestações locais. Durante a filmagem foram feitas entrevistas com os operadores sobre os procedimentos operacionais durante situações de emergência e sobre os meios de armazenamento de informação. Este filme foi também uma fonte de referência bastante importante para a elaboração das bases de conhecimento.

A tendência atual de muitas empresas é deixar a cargo da distribuição a operação das SE's de derivação, como aquela que foi estudada. Este procedimento facilita as operações coordenadas de transferência de carga entre SE's em um caso de perda de alimentadores. O COD supervisiona todas as subestações da região ou da cidade e responde ao COR da região. Quando há um blecaute geral o procedimento atual é o de ilhar o sistema, de maneira que se possa facilitar o trabalho de reenergizá-lo por partes para que em seguida se tente a conexão das ilhas.

Para ilustrar estas diversas condições da SE, no caso, os sistemas, como já foi dito, permitirão a visualização do estado dos equipamentos através de uma representação unifilar da SE com uma cor para cada estado possível de cada equipamento. Para se definir os estados possíveis deve-se inicialmente dividir os equipamentos em duas famílias mais gerais, os equipamentos que seccionam a rede, como disjuntores e chaves, e os equipamentos que transportam e transformam energia, como barramentos, transformadores, alimentadores , etc. No caso dos equipamentos de seccionamento os estados possíveis são fechados ou abertos. Já os equipamentos que transportam energia podem estar nos estados energizados ou desenergizados, ou seja, transportando ou não energia..

Quanto aos arquivos de regras, o protótipo, conforme já apresentado, contém regras para cada um dos subsistemas desenvolvidos : tratamento de alarmes; localização de defeitos; reconfiguração da SE e avaliação do desempenho da manutenção. Cada um destes assuntos é enfocado separadamente a seguir.

5.1.1- Regras para o tratamento de alarmes

A primeira geração de sistemas especialistas desenvolvidos para tratamento de alarmes combinava alarmes e eliminava os redundantes e os de menor importância. A segunda geração levava em conta a ordem dos alarmes e era independente da configuração dos sistemas. A evolução veio no sentido de se levar em conta a ordem e a topologia do sistema, o que resulta na mudança da importância do alarme dinâmicamente. O sistema aqui desenvolvido buscou seguir os sistemas de geração mais moderna.

O nível de classificação das regras é muito importante no encadeamento do raciocínio para a redução dos alarmes em um SE. O protótipo desenvolvido tem como regras de primeiro nível as seguintes:

- regras para as linhas de transmissão e o TAL
- regras para os transformadores
- regras para os alimentadores e o sistema ERAQ
- regras para o serviço auxiliar em CC e em CA

Também pode-se classificar as regras por grau de importância, o que nos leva a priorizar regras relacionadas com eventos que ocasionem o desligamento de equipamentos ou sua possível operação em estados que possam danificá-lo e/ou propagar o defeito por outros equipamentos da rede.

As regras do sistema desenvolvido levam em conta a sequência temporal dos alarmes e o estado topológico dos equipamentos envolvidos.

Para um alimentador, uma regra típica seria:

Se

"o relé de sobrecorrente atuou"

ou

"o relé de impedância atuou"

e

"disjuntor abriu"

então

"o alimentador foi desligado pela proteção"

Uma regra típica associada a um transformador é a seguinte :

Se

" o relé diferencial atuou "

ou

" o relé de gás atuou "

ou

"proteção de sobrecorrente AT atuou"

ou

"relé de sobrecorrente de neutro na BT atuou

ou

"temperatura do óleo"

ou

"válvula de segurança"

e

"disjuntor abriu"

então

"transformador foi desligado pela proteção"

Uma representação em um gráfico tipo e/ou pode tornar mais claro o conceito de regra, que é função dos alarmes emitidos pelo sistema de supervisão. Os alarmes que são disparados estão a esquerda e a conclusão da regra esta a direita, a associação e entre dois alarmes é dada por um arco entre eles, já a ligação ou não possui este arco.A figura 5.1 a seguir mostra as duas regras apresentadas anteriormente na forma de gráfico e/ou.

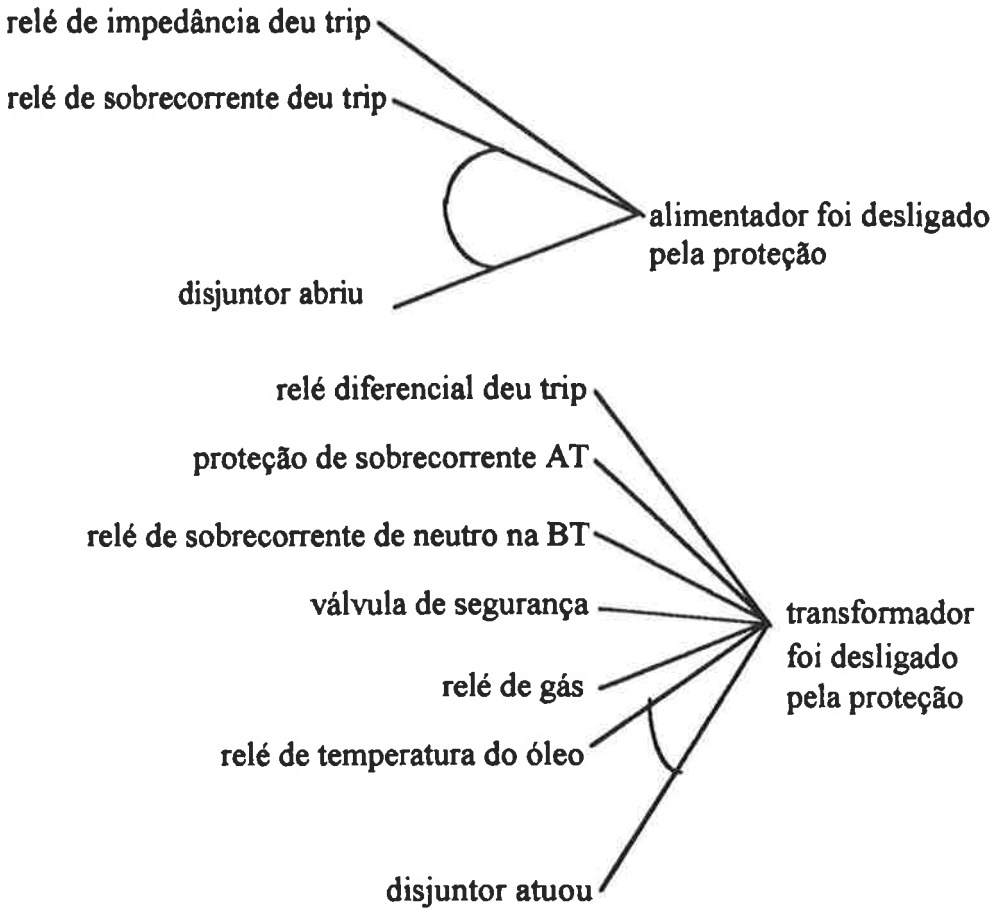

Figura 5.1 - Diagramas e/ou de algumas regras para tratamento de alarmes

No caso do tratamento de alarmes a base de conhecimento é um conjunto de regras que relacionam alarmes gerados pelo sistema de supervisão. Estes alarmes alimentam o sistema especiaslista através de um arquivo de comunicação(banco de fatos), que no caso é

simulado por um arquivo ASCII. Os alarmes do sistema de supervisão vem na seguinte forma:

data - hora - descrição

A seguir são mostrados alguns alarmes como exemplo:

3/2/1993 12:30:40:30:100 relé de sobrecorrente instantaneo do disjuntor Y atuou
3/2/1993 12:30:40:30:300 disjuntor Y atuou

Esta base de conhecimento deverá constar de regras, que relacionam os fatos(alarmes do sistema de supervisão) e que testam relações entre eles, como a ordem dos acontecimentos e o estado operacional dos elemetos antes e após os alarmes.

Com base em análise da lógica dos alarmes e intertravamentos foram geradas regras para a base de conhecimento do sistema especialista para tratamento de alarmes.

A nível de implementação em PROLOG, as regras(predicado) e os alarmes(fatos) e os alarmes tratados tem a seguinte forma:

Regras - regra(numero) :- condicões
Condições - podem ser uma outra regra ou um alarme
Alarme - alarme(tempo, descrição do alarme, equipamento associado)
Alarme Tratado - alartrat(tempo,descrição do alarme, equipamento associado)

As regras podem ter condições que podem pedir que um alarme tenha ocorrido ou que uma outra regra também seja verdadeira, o que pode gerar um encadeamento de regras sendo provadas em retrocesso("backward chaining").

Um problema que se apresentou durante o desenvolvimento deste sistema especialista para tratamento de alarmes foi a necessidade de se ter com segurança o conhecimento do estado operacional dos equipamentos da rede dinâmicamente, ou seja, se uma chave ou disjuntor está fechado ou aberto no período em que se dispara as regras para o tratamento de alarmes. Os alarmes só vão mostrar que houve uma mudança de estado no instante que são disparados. Para solucionar este problema utilizou-se a informação da interface gráfica do unifilar da subestação, em que cada equipamento é colorido de verde ou vermelho, se seu estado é aberto ou fechado respectivamente. Este artificio foi usado em regras que testam qual das linhas ou qual dos transformadores está ligado(ou não) para poder checar se uma manobra foi ou pode ser realizada.

O banco de dados dos equipamentos, para o desenho do unifilar e o de estados operacionais dos equipamentos possuem as seguintes informações:

- tipo de equipamento(disjuntor, chave, transformador, barramento, linha, etc);
- nome e número do equipamento;
- coordenadas do desenho;
- estado operacional do equipamento(aberto ou fechado ou desenergizado e energizado)

Em PROLOG os predicados do banco de dados de desenho são os seguintes:

se(estado, nome da SE, numero de cada tipo de equipamento)

disjuntor(estado,coordenadas, numero, nome)

trafo(estado, coordenadas, numero, nome)

linha(estado, coordenadas, numero, nome)

barra(estado, coordenadas, numero, nome)

alimentador(estado, coordenadas, numero, nome)

chavehorizontal(estado, coordenadas, numero, nome)

chavevertical(estado, coordenadas, numero, nome)

chaveaterramento(estado, coordenadas, numero, nome)

gerador(estado, coordenadas, numero, nome)

bateria(estado, coordenadas, numero, nome)

Existe um outro banco de dados que mostra o estado operacional para todos os equipamentos e para elementos que não tem representação gráfica, como por exemplo o estado do motor da seccionadoras, das portas dos cubículos, etc. O banco de dados de desenhos é atualizado com base nas informações do banco de dados de estados operacionais. Em PROLOG o predicado deste banco de dados tem a seguinte forma:

estaoper(estado, número do equipamento, nome do equipamento)

Dependendo das regras que são disparadas no tratamento de alarmes o estado operacional dos equipamentos deve ser atualizado para que o desenho do unifilar reflita a nova situação operacional da SE. Se por exemplo um disjuntor de um alimentador é desligado a informação do estado deste disjuntor deve ser utilizada para atualizar o estado do alimentador para desenergizado.

As regras estão armazenadas em arquivos tipo ASCII e os alarmes que alimentarão o sistema especialista de tratamento de alarmes para testes são simulados por um arquivo ASCII. Os alarmes tratados são mostrados em uma janela durante a execução do programa e gravados em um arquivo tipo ASCII para posterior análise do operador ou do pessoal interessado em analisar uma perturbação. O programa permite a edição dos alarmes e a visualização dos resultados do tratamento de alarmes, ou seja o arquivo criado após a execução. As regras são editadas por um editor de texto comum, pois estão em um arquivo ASCII de fácil compreensão pelo engenheiro de conhecimento.

Durante o processo de inferencia são gerados os alarmes reduzidos ou seja as conclusões obtidas através do disparo das regras do banco de conhecimento. Um exemplo simples é descrito a seguir:

"alimentador esta desligado pois o alimentador estava ligado e o o seu disjuntor estava ligado e houve atuação do rele de sobrecorrente instantaneo que deu trip no disjuntor e houve atuação do disjuntor do alimentador"

Para a aplicação efetuada (SE em derivação), chegou-se a um número de 72 regras numa primeira análise dos procedimentos operacionais e dos alarmes hoje gerados pelo sistema de supevisão e controle.

Deve-se salientar que esta subestação não possui informações , via alarmes, sobre diversas chaves, o que dificulta a determinação do estado operacional de alguns equipamentos. Outra limitação é quanto a taxa de atualização dos dados analógicos(5 s), o que não permite a sua utilização nas regras, pois a maioria dos eventos ocorre em tempos menores.

5.1.2 - Regras para localização de defeitos

O sistema para localização de defeitos utiliza informações do sistema de alarmes, características da proteção(tipos de relés, coordenação, seletividade e as zonas de proteção) e a topologia da rede com o seu estado operacional de cada componente.

Ressalta-se que, no caso desta subestação não se tem a informação da atuação monofásica dos relés e a taxa de atualização das tensões e correntes é de 5 s(fase B em geral). Assim sendo é possível localizar o defeito mas não é possível determinar em qual fase o mesmo acontece. Se as informações necessárias estivessem disponíveis tal determinação poderia ser efetuada sem qualquer dificuldade adicional.

Uma regra típica do sistema de localização de defeitos é a seguinte:

Se

"proteção de sobrecorrente do alimentador 5 atuou"

e

"não houve comando manual do disjuntor 52-5"

e

"não houve atuação de outra proteção do alimentador 5

então

"houve um curto circuito no alimentador 5"

Como no sistema de tratamento de alarmes as regras estão em um arquivo ASCII e são utilizados os arquivos de alarmes e os de estados operacionais inicial e o atualizado pelo tratamento de alarmes.

O resultado do sistema de localização de defeitos pode ser gravado em um arquivo ASCII, que contém o horário, os equipamentos envolvidos, o tipo e a causa dos defeitos.

O encadeamento temporal dos alarmes deve ser testado nas regras, assim como o estado topológico e operacional dos elementos antes a após os alarmes. Alguns eventos podem acionar várias proteções ao mesmo tempo, principalmente se não estiverem bem definidas as zonas de proteção, o que garante a seletividade, e se a coordenação entre os dispositivos de proteção não estiver corretamente ajustada. Para a aplicação efetuada(SE em derivação), chegou-se a um número de 88 regras numa primeira avaliação dos alarmes atuantes e da proteção da SE.

5.1.3 - Regras para a reconfiguração da sE

No caso do sistema para reconfiguração da SE as regras se baseiam no estado atual da rede, no estado operacional dos equipamentos e na possibilidade de chaveamento em carga ou não dos elementos seccionáveis. O sistema especialista deverá determinar qual os circuitos desligados e tentar achar um caminho alternativo e viável para realimentar estes

circuitos. O problema é mutio parecido com o de reconfiguração de redes, só que em menor escala. A solução para este tipo de problema está no processo de busca em grafos.

O programa usa predicados em PROLOG para gerar um grupo de listas que definam os caminhos entre dois nós de um grafo(sendo um fonte e outro carga), sem que este caminho passe pelo mesmo nó duas vezes, o que caracterizaria um "loop". Os nós fontes possíveis são as duas linhas de transmissão e os nós carga são os 9 alimentadores, as barras de 13.8 kV e a de transferência.

Uma das entradas deste sistema especialista é a estrutura do grafo da subestação, com as seguintes informações:

- nós do grafo(barras, fontes possíiveis, cargas possíveis e pontos intermediários de conexão entre equipamentos),
- arcos do grafo(equipamentos) com informação dos nós que o delimitam, se o arco é um elemento seccionável ou não, e sendo seccionável se é disjuntor ou chave.

O resultado do processamento será uma lista de caminhos possíveis para alimentar as cargas desligadas, que será gravada em um arquivo ASCII. Com as listas de caminhos possíveis, deve-se checar qual deles são viáveis através regras que digam se há equipamentos desligados por atuação da proteção ou do operador e se existem equipamentos seccionáveis sobre carga, para que se possa realizar as manobras de transferência. A seguir é apresentada na figura 5.2 a estrutura em grafo da subestação adotada.

Para facilitar o método de busca pelo grafo optou-se por definir nomes associados aos nós de interligação dos equipamentos o que pode ser implementado por uma estrutura em PROLOG do tipo:

nome-equipamento(número, nome, nó de partida, nó de chegada, tipo de equipamento)

As regras deste sistema também estão em um arquivo ASCII. Para esta aplicação(SE em derivação), foi gerado um número de 61 regras numa primeira avaliação das possibilidades de testes que serão feitos para gerar e avaliar as listas de manobras para o restabelecimento dos circuitos da SE.

5.1.4 - Regras para a avaliação do desempenho da manutenção

A avaliação do desempenho da manutenção está vinculada com o conceito de índice de mérito operativo sugerido por Lineu e Tahan[74]. Este conceito se aplica com maior propriedade a subestações de grande porte que normalmente precisam apresentar valores altos e adequados de índices de confiabilidade do ponto de vista do sistema de geração e transmissão devido à sua importância na cadeia que permite a energia fluir de um ponto a outro do sistema. Alguns aspectos ligados as características operacionais próprias das subestações e dos equipamentos, principalmente daqueles com novas tecnologias, dos quais não se conhece muito bem o desempenho não são usualmente considerados na análise. O índice proposto busca superar esta falha e leva em conta na análise de confiabilidade global da SE, o impacto da confiabilidade dos equipamentos e da eficiência operativa e de manutenção. O índice de mérito operativo é baseado no cálculo do "risco virtual de perda de capacidade de transmissão" como definido a seguir:

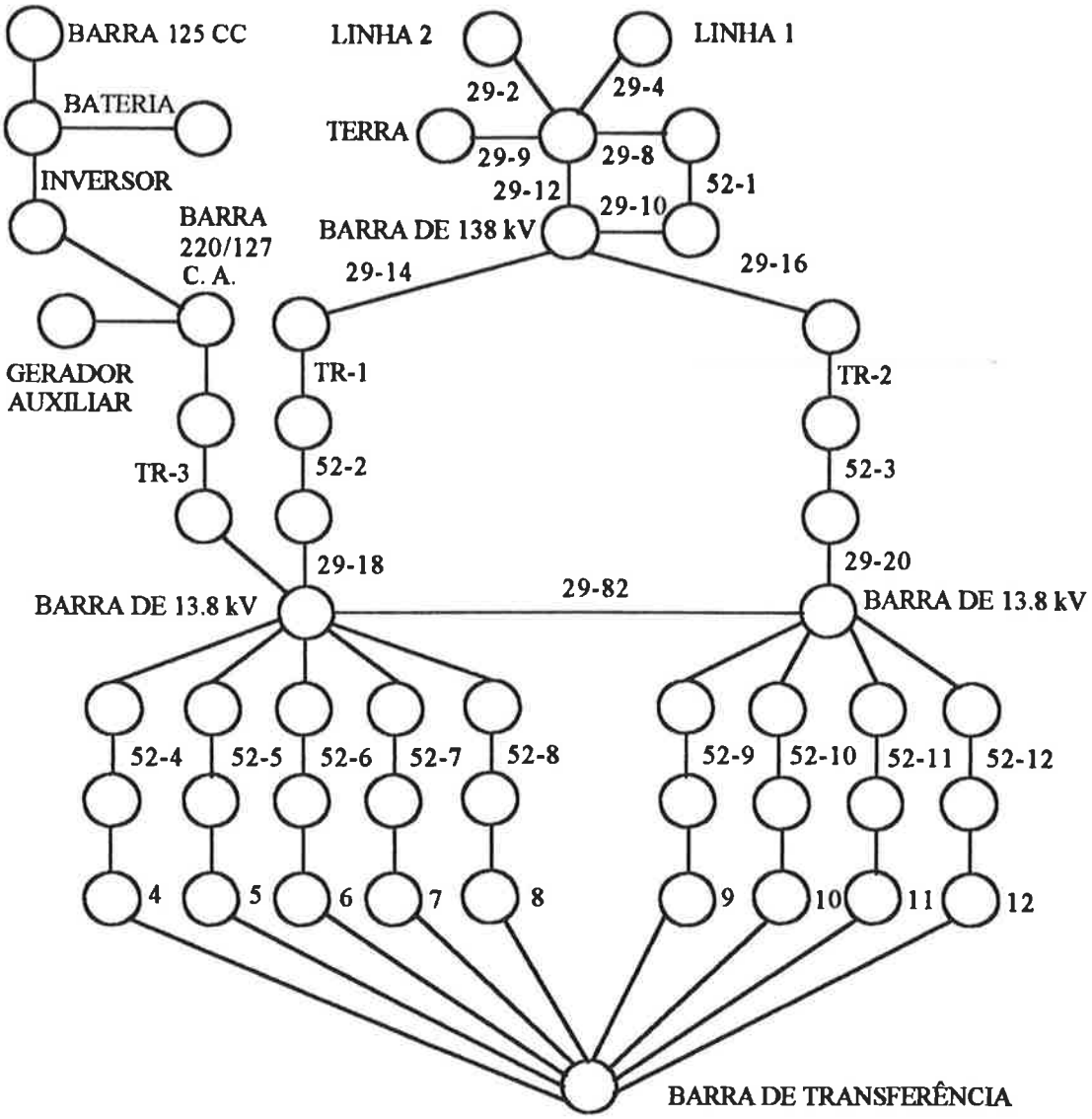

Figura 5.2 - Estrutura do grafo da subestação adotada

$$RISCO_{X\%} = \sum_{CONFIG_i} \left(\frac{\Delta t_{CONFIG_i}}{t_{TOTAL}} \right) .RISCO_{X\%}(CONFIGi)$$

onde:

RISCO x% : risco de perda de x% da capacidade de transmissão

CONFIG i : qualquer configuração operativa assumida pela subestação durante o período de cálculo do índice

t_{TOTAL} : período total a que se refere o índice

$\Delta t_{CONFIG\,i}$: tempo de duração de cada configuração operativa assumida pela subestação

RISCO x%(CONFIG i) : risco de perda de X% da capacidade de transmissão quando na configuração i .

Pode-se construir um gráfico de diferentes patamares de capacidade de transmissão de uma SE(devido a configurações degradadas) em função do índice de mérito. A evolução deste gráfico no tempo pode servir como balizamento da qualidade operativa da SE e orientar ações no sentido de sua eventual melhoria. O índice permite que se avalie separadamente o impacto de cada causa de alteração da configuração, como tipo de defeitos, tipo de manutenção e outros.

Para se elaborar este sistema especialista, deve-se inicialmente construir uma tabela de risco de perda de capacidade de transmissão para cada configuração operacional possível, incluindo as configurações degradadas. Esta tabela, que inicialmente poderá ser construida com índices de confiabilidade históricos de cada equipamento, por exemplo, pode ser recalculada de tempos em tempos, incluíndo índices de confiabilidade da própria SE. Com estes valores e a duração dos tempos de operação nas situações degradadas em relação ao tempo total de análise pode-se determinar o índice de mérito operativo para cada patamar de capacidade de transmissão possível.

A comparação destes índices, com índices determinados como metas desejáveis e a possibilidade de se separar o impacto de cada causa de alteração da configuração, permitirá ao sistema especialista sugerir modificações operativas, ou de equipamentos ou de manutenção, que melhorem o desempenho da SE.

Para a implementação deste sistema é montado um banco de dados histórico da subestação como um todo e de cada equipamento e área de interesse da SE; mostrando os tempos em que cada equipamento esteve em funcionamento ou não e porque disto.

Este banco de dados pode ser efetuado com base em informações da operação quanto às manutenções, se preventivas ou corretivas e, no caso das últimas, em tratamento dos alarmes que retiraram o componente de operação, para identificar separadamente cada causa de alteração da configuração. Tal banco de dados é construído durante o período de operação considerado para avaliação. Um banco de dados clássicos de taxas de falha de equipamentos e tempos de reparo, é também necessário para inicializar o sistema, calculando a tabela de risco acima citada. A substituição dos mesmos por dados históricos da própria subestação, obtidos com o passar do tempo, permitirá a reavaliação da tabela de risco. Com estes dados e informações o cálculo dos índices de mérito é facilmente efetuado.

Este sistema não foi implementado no caso atual, pois a subestação utilizada, de pequeno porte, não se enquadra no conjunto de características para a utilização desta metodologia. Ele foi, no entanto, decrito aqui, para mostrar a sua simplicidade e a facilidade em se dispor de outro sistema especialista conjugado aos anteriores, caso seja recomendável. Tal desenvolvimento deverá ser efetuado oportunamente quando de adaptação do protótipo a SEs de grade porte.

5.2-A interface homem-máquina e os arquivos de trabalho

A interface homem-máquina é efetuada através de menús de opções do tipo "pull-down". Em algumas opções o usuário poderá interagir, via teclado para entrar com os dados necessários para executar aquela opção. A interface homem-máquina também se dará através da visualização da representação gráfica da subestação, que mostrará o estado atual de cada equipamento. A possibilidade de visualizar arquivos históricos de dados da rede e os processos de encadeamento de regras para chegar a alguma conclusão(explicação do "raciocínio"), também são características importantes desta interface.

Existe ainda a possibilidade de se incluir ou alterar as regras dos sistemas especialistas através de um editor de regras, que logicamente será utilizado pelo engenheiro de conhecimento.

A interface possui 5 menús, sendo que o principal permite o acesso aos outros 4 menús. A cada menú apresentado a seguir, também será apresentado um diagrama com os arquivos de trabalho e o sentido de comunicação entre cada sistema especialista e estes arquivos.

<u>Menú principal(menú 1)</u>
desenha(menú 2)
alarmes(menú 3)
defeitos(menú 4)
reconfigura(menú 5)
fim

O menú 2 permite a visualização do desenho unifilar da SE antes e depois do tratamento de alarmes. A alteração do desenho é feita utilizando a informação de um arquivo com dados das coordenadas do desenho dos símbolos de cada equipamento e de dois arquivos contendo os estados operacionais de cada equipamento antes e depois do tratamento de alarmes. Desta maneira depois do tratamento de alarmes pode-se desenhar a

subestação com o seu novo estado operacional . Na figura 5.3 é apresentado o diagrama de comunicação entre o programa que desenha e os arquivos de trabalho.

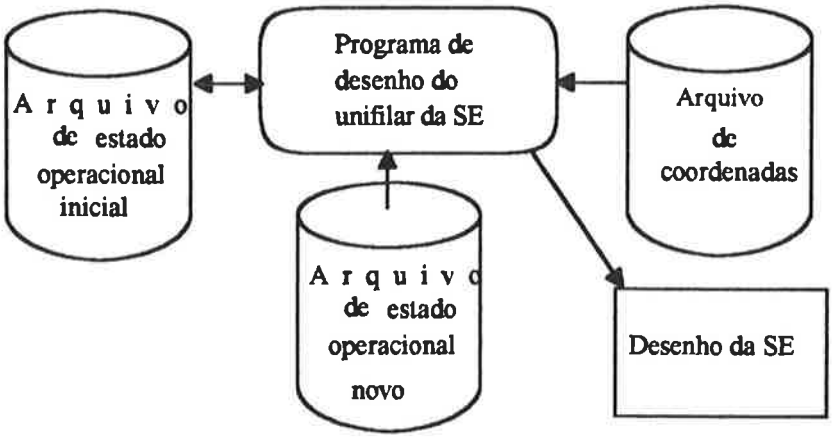

Figura 5.3 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de desenho da SE

<u>Menú Desenho da SE(menú 2)</u>

carrega arquivo de desenho

carrega arquivo estado operacional

atualiza arquivo estado operacional inicial

desenha

socorro

volta para menú anterior

O menú 3 realiza o tratamento de alarmes usando os arquivos de alarmes, o arquivo de estados operacionais iniciais e as regras de tratamento de alarmes. São gerados arquivos de alarmes tratados e do novo estado operacional da SE. A figura 5.4 mostra o diagrama de comunicação entre os arquivos e o sistema de tratamento de alarmes.

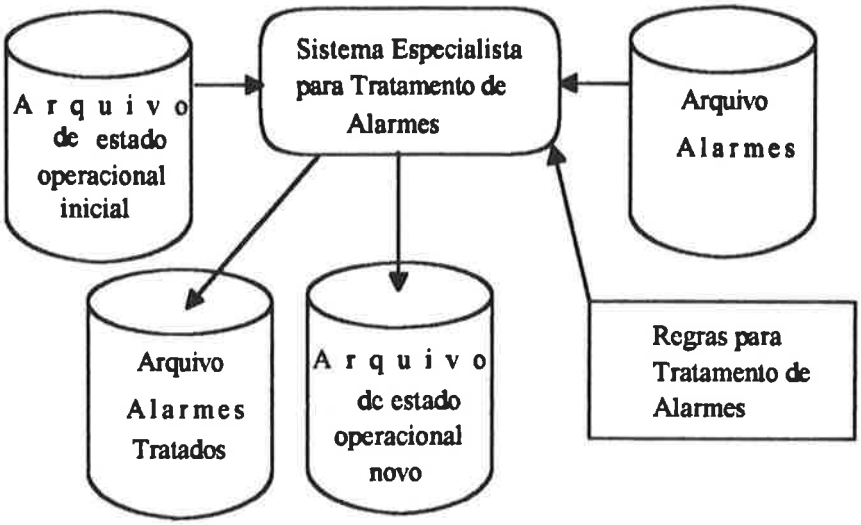

Figura 5.4 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de tratamento de alarmes

<u>Menú Tratamento de Alarmes(menú 3)</u>

carrega arquivo de alarmes

lista alarmes

carrega arquivo de estados operacionais iniciais

processa tratamento de alarmes

salva arquivo com tratamento de alarmes

lista o tratamento de alarmes

salva arquivo com estado operacionais novos

socorro

volta para menú anterior

O menú 4 executa a localização de defeitos utilizando os arquivos de alarmes, os de estados operacionais iniciais e novos e as regras de localização de defeitos. É gerado um arquivo com a localização e causas dos defeitos. A figura 5.5 mostra o diagrama de comunicação entre os arquivos e o sistema de localização de defeitos.

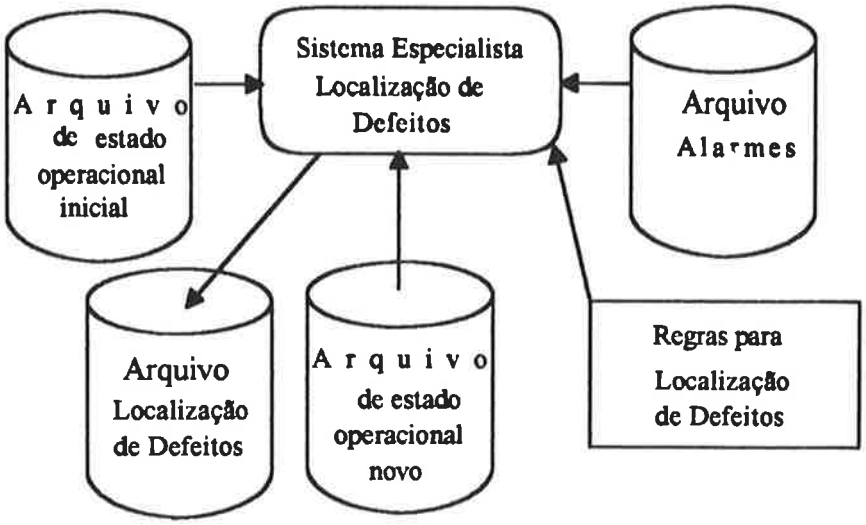

Figura 5.5 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de localização dedefeitos

<u>Menú de Localização de Defeitos(menú 4)</u>

carrega arquivo de alarmes

lista arquivo de alarmes

carrega arquivo de estados operacionais iniciais

carrega arquivo de estados operacionais novos

processa localização de defeitos

salva arquivo com localização de defeitos

lista a localização de defeitos

socorro

volta para o menú anterior

O menú 5 executa a reconfiguração da SE utilizando os arquivos de interligação da SE(grafo), o de estados operacionais novos, os resultados da localização de defeitos e as regras de reconfiguração da SE. É gerado um arquivo com as listas de caminhos possíveis

para alimentar as cargas desenergizadas(listas de manobras). A figura 5.6 mostra o diagrama de comunicação entre os arquivos e o sistema de reconfiguração da SE.

Menú de Reconfiguração da SE(menú 5)

carrega arquivo de estados operacionais novos

carrega arquivo de ligações da SE

carrega arquivo de localização de defeitos

processa reconfiguração da SE

salva arquivo com reconfiguração da SE

lista a reconfiguração da SE

socorro

volta para o menú anterior

Digitando [Esc] é possível retornar ao menú anterior ou se estiver no menú principal sair do programa. Para se movimentar nos menús se utilizam as setas para cima e para baixo. Para selecionar uma opção basta digitar [Enter] quando o cursor estiver sobre a opção desejada.

Cada menú secundário tem um arquivo de socorro, que permite uma rápida leitura do funcionamento de cada sistema.

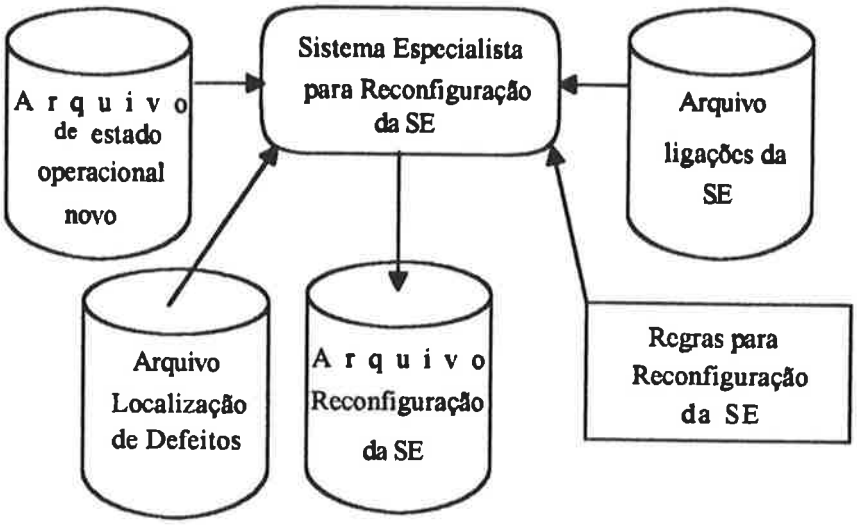

Figura 5.6 - Diagrama de comunicações de arquivos e o módulo de reconfiguração da SE

Para visualizar as regras e editá-las bastará usar um editor comum para programas como o "Norton" ou o "Edit" do DOS com os arquivos de regras de cada sistema. O arquivo de resultados de cada sistema terá os números das regras que foram disparadas, o que permitirá saber a sequência do encadeamento de regras. Pode-se guardar o estado operacional a cada tratamento de alarmes ou ainda gravar o novo estado sobre o anterior depois de executar a localização de defeitos.

A melhor sequência de utilização dos menús seria está:

-mostrar o desenho inicial da SE na tela;

-executar o tratamento de alarmes e salvar o novo estado operacional da SE;

-executar a localização de defeitos;

-mostrar o desenho novo da SE;

-executar a reconfiguração da SE.

CAPÍTULO 6

TESTES E SIMULAÇÕES

6.1-Casos Simulados

Para testar os sistemas desenvolvidos seria ideal alimentá-los com uma lista de alarmes, oriunda do sistema de supervisão e controle, e o estado operacional da SE antes das perturbações. A lista de alarmes viria por uma porta de comunicação do micro e seria gravada em um arquivo. No nosso caso este arquivo será preparado em um editor de textos.

Para gerar estes arquivos de alarmes usou-se como referência pedaços do "log-file"gerado continuamente pelo sistema de supervisão e controle da SE em questão. Na análise dos alarmes deste pedaço do "log-file" surgiram alguns problemas:

- as listas que foram fornecidas tem vários alarmes que podem ser desconsiderados, pois foram gerados por indução(os cabos serão substituídos por fibras ópticas) e também há alarmes repetivos("bouncing") ;
- como a lista de alarmes pertence na verdade ao "log-file", ou seja o arquivo de registros de eventos que ocorrem na SE, não se tem necessariamente uma perturbação nesta lista.
- o sistema de supervisão e controle da SE ainda estava em testes na época.

A seguir é apresentado com todos os detalhes um pedaço do "log-file" do dia 23 de junho de 1992:

23/06 13:41:00:360 153 BLOQUEOU RELIGAMENTO CUB. 52-11
23/06 13:42:06:410 153 BLOQUEOU RELIGAMENTO CUB. 52-10
23/06 13:45:43:582 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10
23/06 13:49:02:279 153 DESBLOQUEOU RELIGAMENTO 52-10
23/06 13:49:19:544 153 DESBLOQUEOU RELIGAMENTO 52-11
23/06 14:29:19:436 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10
23/06 14:29:29:926 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:29:36:954 153 FALTOU C.C. ALIMENTADORES 13.8 kV

23/06 14:30:30:678 153 RESTAUROU C.C. ALIMENTADORES 13.8 kV

23/06 14:30:52:984 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:30:56:674 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:34:07:426 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:34:16:920 153 DESATUOU PROTECAO SOBRECORRENTE CUB. 52-10

23/06 14:34:16:982 153 ATUOU PROTECAO DE SOBRECORRENTE CUB. 52-10

23/06 14:34:16:967 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:34:50:349 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:34:50:410 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:35:09:512 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:35:53:731 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:35:54:377 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:35:53:689 153 DESATUOU PROTECAO SOBRECORRENTE CUB. 52-10

23/06 14:35:53:730 153 DESATUOU PROTECAO SOBRECORRENTE CUB. 52-10

23/06 14:36:47:802 153 ATUOU PROTECAO SOBRECORRENTE CUB. 52-10

23/06 14:36:47:835 153 DESATUOU PROTECAO SOBRECORRENTE CUB. 52-10

23/06 14:36:47:826 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:36:48:496 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:37:05:447 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:37:05:453 153 DESATUOU PROTECAO SOBRECORRENTE 52-10

23/06 14:37:08:645 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:41:15:519 153 DESLIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 14:55:04:910 153 BLOQUEOU RELIGAMENTO CUB. 52-11

23/06 14:55:18:522 153 BLOQUEOU RELIGAMENTO CUB. 52-10

23/06 14:58:29:231 153 LIGOU DISJUNTOR 52-4

23/06 14:58:29:231 153 LIGOU DISJUNTOR 52-6

23/06 14:59:32:516 153 LIGOU DISJUNTOR 52-10

23/06 15:03:28:963 153 DESBLOQUEOU RELIGAMENTO CUB. 52-10

23/06 15:04:02:125 153 DESBLOQUEOU RELIGAMENTO CUB. 52-11

23/06 15:04:17:671 153 FECHOU PORTA CUBICULO

23/06 15:04:18:061 153 ABRIU PORTA CUBICULO
23/06 15:04:18:891 153 FECHOU PORTA CUBICULO
23/06 15:26:59:462 153 FECHOU PORTA CUBICULO
23/06 15:27:09:703 153 ABRIU PORTA CUBICULO

Analisando-se este pedaço do "log-file" pode-se perceber que estavam sendo feitos uma série de testes de comunicação com os disjuntores, as proteções, o sistema de religamento e as portas dos cubículos. Pode-se notar também que alguns alarmes aparecem na lista com horários menores que os seus antecessores.

Além do pedaço da listagem do dia 23 de junho foram também enviados pedaços das listagens dos dias 9 e 10 de julho de 1993.

Devido a estes problemas, foram geradas outra listas de alarmes, que simulam uma ou várias perturbações. Foi assumido um estado operacional inicial da SE para que se pudesse testar o conjunto de sistemas especialistas.

O primeiro caso analisado tem os seguintes eventos : há uma transferência automática de linha devido ao desligamento da linha 1, em seguida o transformador 2 e o alimentador 6 são desligados. e fianalmente há um religamento do alimentador 6.

O segundo caso analisado tem os seguintes eventos: houve o desligamento do transformador 1, a atuação do ERAC, o desligamento dos alimentadores 9, 10, 11 o ERAC desatuou e houve o religamento dos alimentadores 9, 10 e 11 e finalmente o desligamento do disjuntor 52-1.

6.2 - Resultados

A figura 6.1 mostra o unifilar da SE com o estado operacional inicial antes do tratamento de alarmes, sendo que em verde estão os elementos abertos e os desenergizados e em vermelho os elementos fechados e os energizados. Analisando-se o unifilar percebe-se que a linha 1

alimenta a SE, os dois transformadores estão alimentando cada conjunto de alimentadores separadamente e o serviço auxiliar funciona normalmente através do transformador ligado a barra de 13.8 kV.

Para cada caso analisado serão mostrados os alarmes e os resultados obtidos para cada sistema especialista e o diagrama unifiliar com o novo estado operacional da SE.

CASO 1

alarmes

25/09 14:30:10:100 TAL atuou

25/09 14:30:10:200 52-1 abriu

25/09 14:30:11:100 29-4 abriu

25/09 14:30:12:300 29-2 fechou

25/09 14:30:13:150 52-1 fechou

25/09 15:00:20:100 temperatura do enrolamento atuouTR-2

25/09 15:00:21:050 ventilação atuou TR-2

25/09 15:00:23:300 ventilação forçada atuou TR-2

25/09 15:00:23:500 disjuntor 52-3 atuou TR-2

25/09 16:00:34:600 prot. sobr. CUB-10 atuou

25/09 16:00:34:800 disjuntor 52-6 atuou

25/09 16:00:34:900 disjuntor 52-6 atuou

25/09 16:00:35:020 disjuntor 52-6 fechou

25/09 16:00:35:220 disjuntor 52-6 fechou

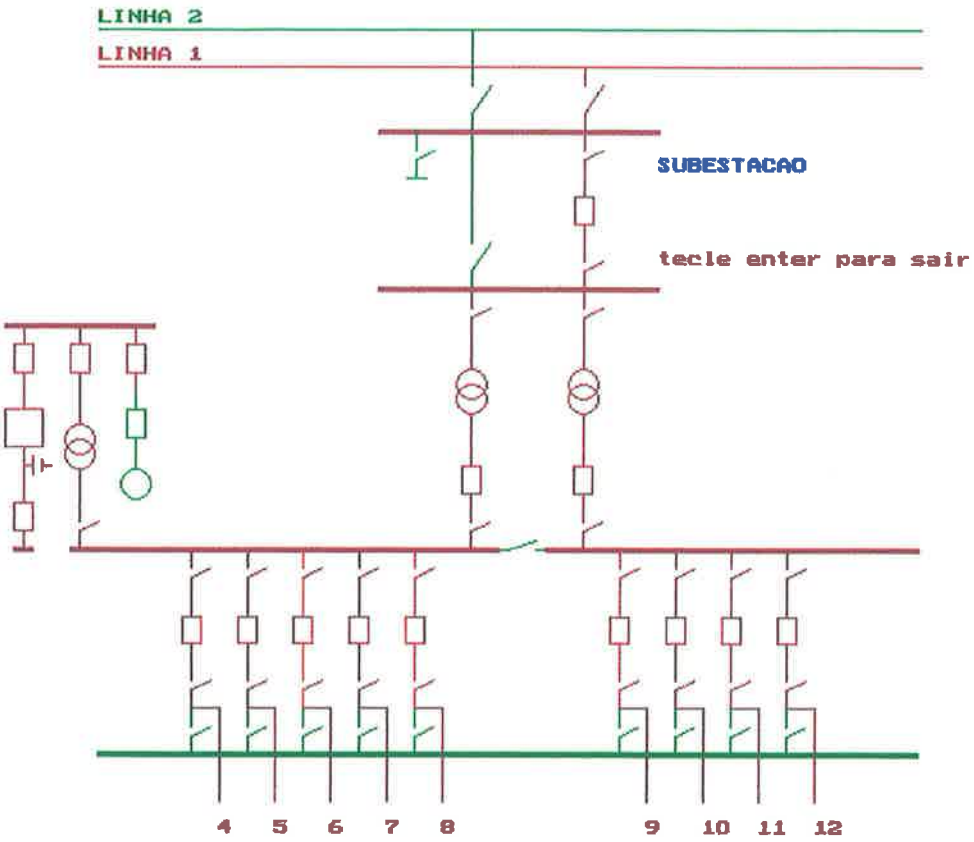

Figura 6.1 - Diagrama unifilar da SE para o estado operacional inicial

resultado do tratamento de alarmes

25/09 14:30:13:150 transferência da linha 1 para a linha 2

25/09 15:00:23:500 transformador 2 desligado

25/09 16:00:34:800 alimentador 6 desligado

25/09 16:00:35:020 alimentador 6 religado

resultado da localização de defeitos

25/09 14:30:10:100 defeito na linha 1

25/09 15:00:20:100 sobrecarga TR-2

25/09 16:00:34:600 curto circuito no alimentador 6

25/09 16:00:35:020 alimentador 6 religado

resultado da reconfiguração da SE

Neste caso a subestação perdeu o transformador 2, o que acarreta a perda da alimentação dos alimentadores 9, 10, 11 e 12, ou melhor da barra de 13.8 kV do TR-2.

as alternativas de alimentação dadas pelo sistema são as seguintes:

-linha 2, 29-2, 29-8, 52-1, 29-10, 29-14, TR-1, 29-18, 29-82, barra 13.8 kV do TR-2.

-linha 2, 29-2, 29-8, 52-1, 29-10, 29-14, TR-1, 29-18, 29-22, 52-4, 29-24, 29-26, barra de transferência, 29-56, 29-54, 52-9, 29-52, barra 13.8 kV do TR-2.

- linha 2, 29-2, 29-8, 52-1, 29-10, 29-14, TR-1, 29-18, 29-22, 52-4, 29-24, 29-26, barra de transferência, 29-62, 29-60, 52-10, 29-58, barra 13.8 kV do TR-2.

- linha 2, 29-2, 29-8, 52-1, 29-10, 29-14, TR-1, 29-18, 29-22, 52-4, 29-24, 29-26, barra de transferência, 29-68, 29-66, 52-11, 29-64, barra 13.8 kV do TR-2.

- linha 2, 29-2, 29-8, 52-1, 29-10, 29-14, TR-1, 29-18, 29-22, 52-4, 29-24, 29-26, barra de transferência, 29-74, 29-72, 52-12, 29-70, barra 13.8 kV do TR-2.

- existem mais 16 combinações entre os disjuntores 52-5, 52-6, 52-7, e 52-8 com os disjuntores 52-9, 52-10, 52-11 e 52-12 e suas chaves associadas.

Todas estas operações exigem a presença do operador na SE, pois não há comando remoto das chaves de 13.8 kV. A operação mais recomendável é aquela que desliga o menor número de consumidores com o menor número de manobras. Esta operação de chaveamento

dentro da SE só deve ser feita se não houver alternativa de socorro por outros alimentadores fora da SE. No caso em que a concessionária tenha passado a operação desta SE para a distribuição, será necessária uma integração entre os procedimentos operacionais de chaveamento da SE com os de reconfiguração da rede de distribuição. Um nível de decisão hierarquicamente superior se faz necessário para que se possa optar por manobras na rede ou na SE. O diagrama unifilar do estado operacional final é mostrado na figura 6.2.

CASO 2

alarmes

18/07/93 9:30:40:350 disjuntor 52-2 abriu
18/07/93 9:50:10:190 ERAC atuou
18/07/93 9:50:10:300 disjuntor 52-9 abriu
18/07/93 9:50:10:310 disjuntor 52-9 abriu
18/07/93 9:50:40:310 disjuntor 52-10 abriu
18/07/93 9:50:40:340 disjuntor 52-11 abriu
18/07/93 9:50:40:390 disjuntor 52-12 abiru
18/07/93 9:50:42:210 ERAC desatuou
18/07/93 9:50:10:300 disjuntor 52-12 fechou
18/07/93 9:50:10:320 disjuntor 52-12 fechou
18/07/93 9:30:40:310 disjuntor 52-11 fechou
18/07/93 9:50:40:310 disjuntor 52-10 fechou
18/07/93 9:30:40:350 disjuntor 52-9 fechou

resultado do tratamento de alarmes

18/07/93 9:30:40:240 diferencial atuou TR-1
18/07/93 9:30:40:350 TR-1 desligado
18/07/93 9:50:42:210 ERAC atuou
18/07/93 9:50:10:310 alimentador 9 desligou

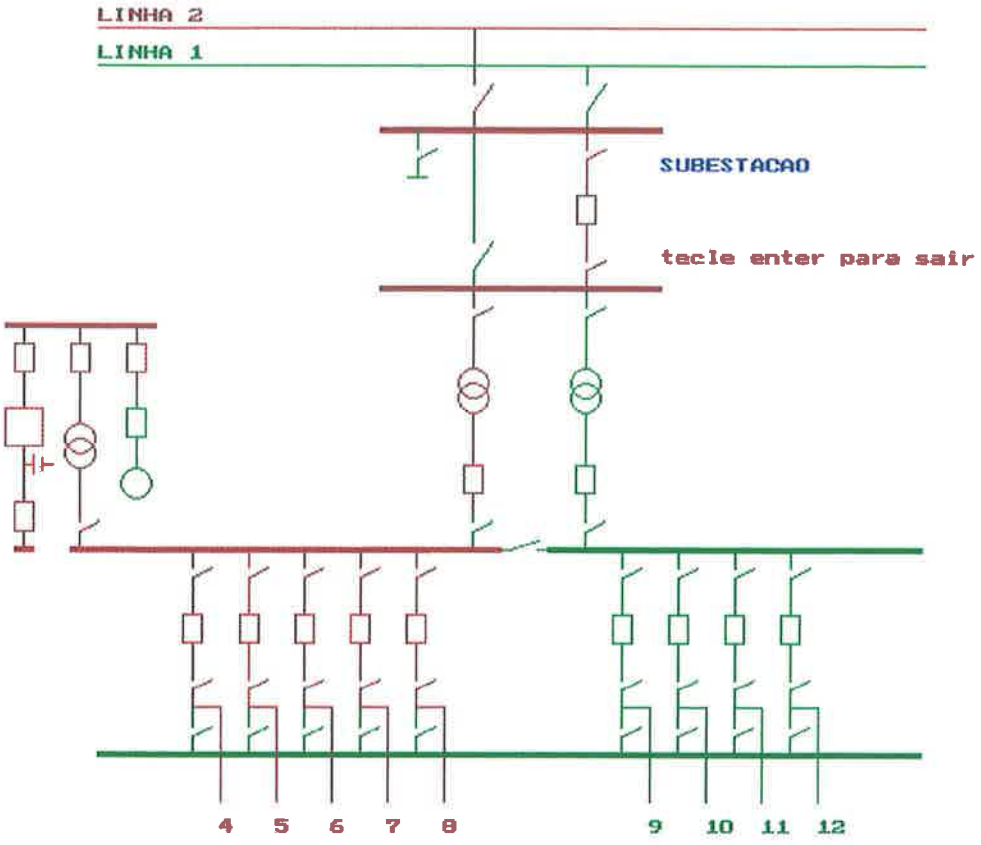

Figura 6.2 - Diagrama unifilar da SE para o estado operacional final do primeiro caso

18/07/93 9:50:40:310 alimentador 10 desligou

18/07/93 9:50:40:340 alimentador 11 desligou

18/07/93 9:50:40:390 alimentador 11 desligou

18/07/93 9:50:42:210 ERAC desatuou

18/07/93 9:50:42:300 alimentador 12 religou

18/07/93 9:30:42:410 alimentador 11 religou

18/07/93 9:50:42:510 alimentador 10 religou

18/07/93 9:30:42:660 alimentador 9 religou

<u>resultado da localização de defeitos</u>

18/07/93 9:30:40:240 defeito interno TR-1

18/07/93 9:50:10:310 ERAC desligou alimentador 9

18/07/93 9:50:40:310 ERAC desligou alimentador 10

18/07/93 9:50:40:340 ERAC desligou alimentador 11

18/07/93 9:50:40:390 ERAC desligou alimentador 11

18/07/93 9:50:42:300 ERAC religou alimentador 12

18/07/93 9:50:42:410 ERAC religou alimentador 11

18/07/93 9:50:42:510 ERAC religou alimentador 10

18/07/93 9:30:42:660 ERAC religou alimentador 9

<u>resultado da reconfiguração da SE</u>

Como o transformador 1 está desligado as opções de alimentação da barra de 13.8 kV do transformador 1 serão:

- linha 1, 29-4, 29-8, 52-1,29-10, 29-16, TR-2, 52-3, 29-20, 29-82, barra de 13.8 kV TR-1

- linha 1, 29-4, 29-8, 52-1, 29-10, 29-16, TR-2, 52-3, 29-20, 29-52, 52-9, 29-54,29-56, barra de transferência, 29-50, 29-48, 52-8, 29-46, barra de 13.8 kV TR-1,

- linha 1, 29-4, 29-8, 52-1, 29-10, 29-16, TR-2, 52-3, 29-20, 29-52, 52-9, 29-54,29-56, barra de transferência, 29-44, 29-42, 52-7, 29-40, barra de 13.8 kV TR-1,

- linha 1, 29-4, 29-8, 52-1, 29-10, 29-16, TR-2, 52-3, 29-20, 29-52, 52-9, 29-54,29-56, barra de transferência, 29-38, 29-36, 52-6, 29-34, barra de 13.8 kV TR-1,

- linha 1, 29-4, 29-8, 52-1, 29-10, 29-16, TR-2, 52-3, 29-20, 29-52, 52-9, 29-54,29-56, barra de transferência, 29-32, 29-30, 52-5, 29-28, barra de 13.8 kV TR-1,

- linha 1, 29-4, 29-8, 52-1, 29-10, 29-16, TR-2, 52-3, 29-20, 29-52, 52-9, 29-54,29-56, barra de transferência, 29-26, 29-24, 52-4, 29-22, barra de 13.8 kV TR-1,

- mais 15 opções combinando os disjuntores 52-10, 52-11, 52-12 e os disjuntores 52-8, 52-7, 52-6, 52-5 e 52-4 e as suas chaves associadas.

A escolha recairá por aquela opção que tiver o menor número de cargas afetadas e o menor número de manobras. As alternativas só serão exeecutadas se não houver opção de transferir a carga dos alimentadores para outros de socorro. Como no caso 1 mostrado anteriormente é necessária a avaliação conjunta do pessoal da operação da SE com o pessoal de operação da distribuição.

Existem vários trabalhos a nível internacional e mesmo nacional na liha de estudos de métodos de reconfiguração de redes de distribuição devido a ocorrência de perturbações na rede, como curtos-circuitos e sobrecargas. Os sistemas especialistas se mostraram como uma boa alternativa para a solução destes problemas e a tendência é a integração entre estes sistemas especialistas de reconfiguração de distribuição e os da subestação de energia., permitindo assim um maior número de alternativas de reconfiguração.

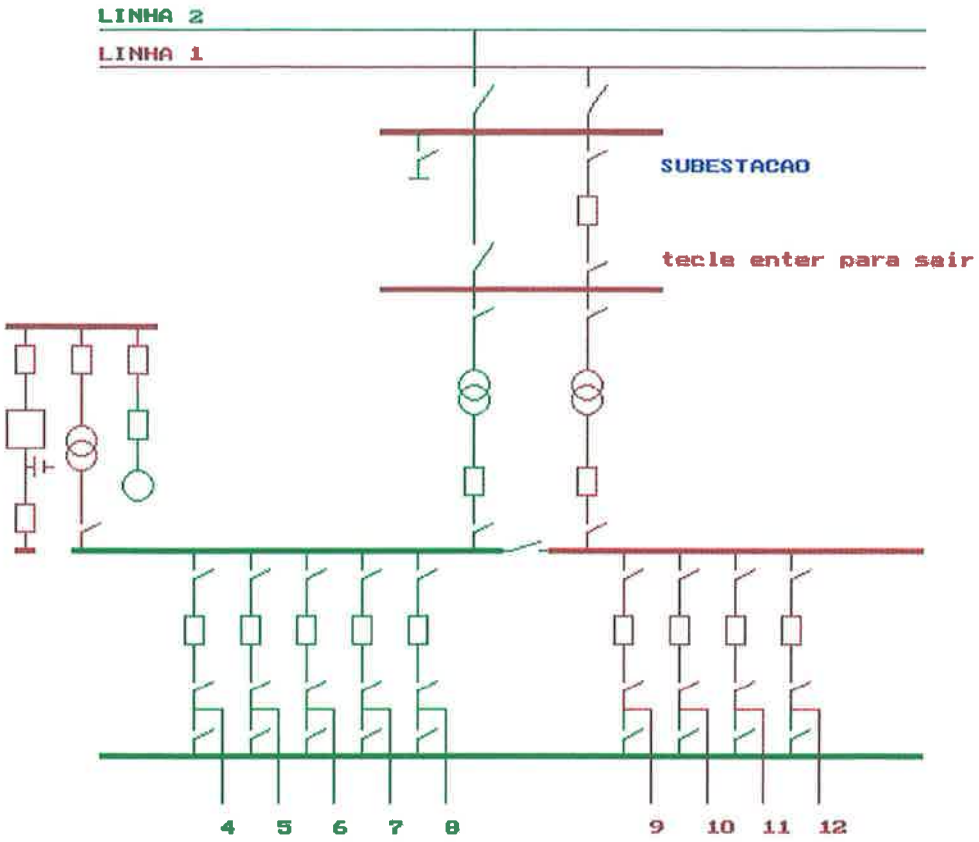

Figura 6.3 - Diagrama unifilar da SE para o estado operacional final do segundo caso

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 - Aspectos fundamentais do desenvolvimento

Este trabalho apresentou inicialmente uma visão geral do que são conceitualmente os sistemas especialistas e o estado da arte de suas aplicações em sistemas elétricos de potência. Houve maior enfase às aplicações à operação, monitorização e manutenção de subestações, áreas especificamente enfocadas neste trabalho. Em seguida foram estabelecidas características básicas para o desenvolvimento e implementação de um conjunto de sistemas especialistas para subestações elétricas com as seguintes funções básicas:

- tratamento de alarmes;
- localização de defeitos;
- reconfiguração;
- avaliação do desempenho da manutenção.

Foi proposta uma estrutura de dados, que pode ser implementada de maneira a permitir a elaboração destes sistemas, de uma forma coordenada, configurando um avanço em relação aos sistemas especialistas citados na literatura.

Foram implementadas rotinas de interface homem-máquina que permitem através de menús a possibilidade de se carregar os bancos de dados para realizar as funções propostas.

Uma interface gráfica com a representação do unifilar da SE escolhida para o desenvolvimento dos protótipos foi desenvolvida permitindo assim a observação dinâmica do estado dos equipamentos da rede.

No conjunto de sistemas especialistas desenvolvidos foram implementadas apenas as tres primeiras funções citadas acima, por se adequarem naturalmente ao porte da SE escolhida. Quanto a função de avaliação do desempenho da manutenção, também contribuição original

deste trabalho, foram apresentadas apenas as diretrizes e principais requisitos relacionados com seu desenvolvimento; isto porque esta função é mais adequada a subestações de grande porte, diferentes da usada no trabalho. A descrição efetuada, no entanto, deixou claro que a implementação de tal função não imporá qualquer dificuldade ao desenvolvimento do conjunto completo de sistemas especialistas.

Finalmente algumas simulações de listas de alarmes e estados iniciais da SE foram utilizadas para testar a resposta das funções implementadas, mostrando resultados promissores e com um grau de acerto elevado, o que indica que o sistema desenvolvido, é um embrião confiável para maiores sofisticações.

A utilização da linguagem PROLOG se mostrou eficiente para implementar o protótipo rápidamente, embora se visualizasse que o uso de uma liguagem que permita um ganho de velocidade e a implementação de outras máquinas de inferência mais rápidas, poderão permitir o desenvolvimento de sistemas especialistas mais sofisticados e assim possibilitar a integração com um sistema de supervisão em tempo real.

A possibilidade de se usar as medidas analógicas de tensão, corrente ou potência, com uma taxa de atualização maior, em alguns pontos ou equipamentos da SE nas regras dos sistemas especialistas poderia tornar o nível de desempenho mais elevado.

7.2- Conclusões e sugestões para futuros trabalhos

A área de aplicações de sistemas especialistas à sistemas de potência se mostra muito promissora, o que pode ser facilmente percebido pelo elevado e crescente número de trabalhos apresentados a cada ano. Pelas pesquisas realizadas, principalmente pela CIGRÉ, percebe-se também que ainda não há confiança total no potencial dos sistemas especialistas e no seu desempenho, e que a execução de testes é bastante importante para firmar esta tecnologia. Por outro lado, há grandes expectativas com relação à novas técnicas de desenvolvimento de sistemas especialistas como a modelagem por objetos, o processamento paralelo, etc. Existe também um esforço na utilização de outras técnicas de inteligência artificial em problemas de

sistemas de potência como por exemplo as redes neurais, a lógica "fuzzy" e os algoritmos genéticos. Há também uma linha de trabalho que tenta integrar os sistemas especialistas e recursos utilizados nos ditos processamentos algoritmicos, como a programação linear, inteira e dinâmica bem como sistemas clássicos como programas de fluxo de potência, de cálculo de curto-circuitos, de cálculo de estabilidade. Existem também tentativas de se usar outros técnicas de modelagem, como redes de petri, para de tentar modelar sistemas dinâmicos no tempo.

O enfoque deste trabalho foi uma aplicação a operação. monitorização e manutenção de subestações, visando a melhora da operacionalidade do sistema, considerando principalmente as dificuldades em investir em uma melhora da rede e também o elevado número de informações recebido, nos novos sistemas digitais de coleta de informações, pelo operador de uma SE, ou de um sistema regional(COR) ou ainda de um sistema central(COS).

O trabalho aqui apresentado é o primeiro trabalho na EPUSP com desenvolvimento de sistemas especialistas aplicados à operação, monitorização e manutenção de SE. Este trabalho faz parte de um escopo maior que pretende atacar os problemas de operação não só das subestações como também das usinas de geração e do sistema como um todo em seus diversos níveis hierárquicos(regionais e o sistema integrado).

A SE utilizada sendo de pequeno porte e de configuração simples(barra simples com barra de transferência) e também tendo um número de pontos de alarme pequeno e com informações monofásicas, acabou limitando o potencial de desenvolvimento de regras, principalmente no sistema especialista para localização de defeitos.

A falta de alarmes associados a todas as chaves da SE dificultou a geração de algumas regras ou mesmo da atualização da estado operacional da rede. Uma solução para isto seria implementar um editor de estado operacional das chaves, no qual o operador atualizaria após uma perturbação ou mesmo uma manobra.

A interface desenvolvida se mostrou muito amigável devido a possibilidade de visualização do estado de cada equipamento apresentado na representação unifilar, o uso de menús também facilitou a "navegação" pelas aplicações.

A possibilidade de se armazenar os resultados em arquivos tipo ASCII para uma posterior análise também é um recurso que torna o sistema muito prático.

As simulações de perturbações dadas através de listas de alarmes e de topologias iniciais da SE geraram resultados coerentes quando processadas pelos sistemas de tratamento de alarmes, localização de defeitos e reconfiguração da SE.

É importante ressaltar que a fase do levantamento do conhecimento foi muito produtiva pois a empresa que forneceu as informações permitiu uma visita a subestação de interesse e ao COD a que ela está vinculada, o que que resultou em uma série de esclarecimentos que o pessoal do escritório não poderia dar.

Potencialmente os protótipos desenvolvidos podem evoluir através da utilização por operadores, que poderão detectar falhas e sugerir melhorias na interface e mesmo no conjunto de regras utilizadas.

O TURBO-PROLOG se mostrou uma boa linguagem para desenvolver o protótipo devido principalmente a facilidade de sua utilização, por ser um ambiente integrado com editor e "trace" acoplados, e ao grande número de predicados já implementados facilitando assim a construção dos programas. Os problemas devido a necessidade de prototipação dos dados, que não é característica de um PROLOG puro como o ARITY-PROLOG, não ocasionaram muitas dificuldades e mesmo a limitação do processo de encadamento ser fixa("backward chaining") também não ocasionou problemas, pois o sistemas desenvolvidos se encaixam bem neste tipo de encadeamento de regras. As limitações de memória levaram a uma revisão da idéia inicial de colocar todos os sistemas em um único módulo de programa.

As propostas para continuidade deste trabalho estão divididas em sete famílias básicas, que não são excludentes:

-colocar os sistemas para teste com operadores de SE para avaliar as falhas de desenvolvimento e sugerir alterações no projeto, como novas regras e uma melhoria da interface;

-portar o sistema desenvolvido para uma linguagem que permitá respostas mais rápidas e uma possível integração com um sistema de supervisão e controle;

-desenvolver novos protótipos de sistemas especialistas para auxílio a operação, monitorização e manuteção de subestações como por exemplo sistemas de proteção adaptativos as novos configurações de SEs, etc;

-desenvolver protótipos de sistemas especialistas para SEs maiores e de maior grau de complexidade;

-desenvolver protótipos de sistemas especialistas para usinas de geração e para os sistemas regionais e central permitindo a troca de informações entre eles;

-desenvolver sistemas especialistas em outras áreas de aplicação em sistemas de potência como projetos, planejamento, etc;

-implementar a utilização de novas ferramentas para a resolução de problemas em sistemas de potência como por exemplo, lógica "fuzzy", redes neurais, algoritmos genéticos e redes de petri.

Como outras aplicações de sistemas especialistas a SEs, pode-se citar que poderão ser desenvolvidos alguns trabalhos, como o de Machias et alli[75] e o de Lambert e Mukhedkar[76] sobre o projeto e o teste de malhas de terra de subestações. Existe ainda uma série de trabalhos sobre o diagnóstico "on-line" de equipamentos em subestações e em usinas[77], [78] com características mais de sistemas preditivos, pois eles acompanham alguns parâmetros, que indicam o nível de degradação dos equipamentos e de seus componentescom o tempo e com o tipo de curva de trabalho que lhe é aplicado, como a isolação elétrica . Em 1992 , Sun et alli[79] apresentaram um trabalho sobre um sistema especialista para teste de dados de relés, que responde as seguintes perguntas básicas: O relé operou corretamente para todas as faltas? O relé operou no tempo certo? Qual o melhor relé para esta aplicação?

O volume de trabalhos propostos vai gerar a necessidade da criação de um área de concentração de pesquisa, com uma equipe composta de alunos de iniciação científica, pesquisadores, alunos de mestrado e doutorado, necessitando logicamente de recursos como computadores e periféricos e "softwares", como linguagens e "shells", para o desenvolvimento dos protótipos.

A cooperação das empresas de energia é essencial para a continuidade dos trabalhos, pois elas são a pricipal fonte do conhecimento do sistema elétrico. É função da universidade mostrar a possibilidade do trabalho conjunto empresa-universidade através de palestras, cursos, seminários e congressos, que permitam mostrar trabalhos na área da aplicação destas novas técnicas de atacar velhos problemas, muitos deles não resolvidos por técnicas ditas tradicionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] RICH, E. **Artificial intelligence.** 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1991.

[2] WINSTON, P. H. **Artificial intelligence.** 3.ed. Reading, Addison Wesley, 1992.

[3] WATERMAN, D. A. **A guide to expert systems.** Reading, Addison Wesley, 1986.

[4] SIMONS,G. L. **Introdução à inteligência artificial.** Lisboa, Clássica, 1986.

[5] FREGNI, E. **Pluralismo na solução de problemas.** São Paulo, 1993. EPUSP Apresentado na disciplina Introdução à Inteligência Artificial. Xerocopiado São Paulo, 1993.

[6] ZHANG, Z. Z.; HOPE, G. S.; MALIK, O. P. Expert systems in eletric power systems : a bibliographical survey. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 4, n. 4, p.1355-61, Oct.1989.

[7] SAKAGUSHI , T.; MATUSUMOTO, K. Development of a knowledge based system for power system restoration. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 102, n. 2, p.320-9, Feb 1983.

[8] DILLON,T. S.; LAUGHTON, M. A. **Expert Systems Applications in Power Systems.** Englewood Cliffs, Prentice Hall , 1990. (Prentice-Hall International Series in Power Systems Computation).

[9] GERMOND, A. et al. An international survey of the pesent status and the perspective of expert systems on power system analysis and techniques. **Electra** n. 123, p. 70-94, 1988.

[10] VAN SON, P. J. M.; SFORNA, M. Exploring user requirements of expert systems in power system operation and control. **Electra** n. 146, p. 69-83, 1993

[11] DILLON, T. S. Survey on expert systems in alarm handling. **Electra** n. 139, p. 132-51, 1991.

[12] LIU, C. C. A progress report on pratical use of expert systems in planning and operation. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS, 34, Paris, CIGRÉ, 1992, p. 38.03.10 .

[13] **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** Expert systems aplications in power systems. Guildford, v. 14, n. 2/3, Apr./June 1992. Special Issue

[14] **Proceedings of the IEEE** Knowledge-based systems in electric power systems. New York,, v. 80, n. 5, May 1992. Special Issue

[15] LACERDA,P. N. DE **Protótipo de um sistema especialista para auxílio à operação de subestações de alta tensão.** , Florianópolis, 1987, 132 p. Dissertação(Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.

[16] RIBEIRO, G. M.; TORRES, G. L. ESRASE-expert system for automatic restoration of substation. In: SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA, 3° , 1992. **Artigos selecionados** Belo Horizonte CEMIG/ELETROBRÃS, 1992 n SP 04.

[17] RIBEIRO, G. M.; COSTA, C.I.A.; TORRES, G. L.; SILVA, A. P. A. DA ESRASE - Sistema especialista para restabelecimento automático de subestações. In : SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 1°, Rio Claro, 1993. **Anais.** Rio Claro, UNESP/SBA, 1993. p. 115-24.

[18] TORRES, G. L.; ROSSI, R.; RIBEIRO, G. M.; VALIQUETTE, B.; MUKHEDKAR, D. - Computer program package for power system protection and control. . In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS , 34, Paris, CIGRÉ, 1992. p. 39.304.

[19] VALIQUETTE, B.; TORRES, G. L.; OLIVIER, G.; MUKHEDKAR, D. Knowledge enginnering tool for emergency power system operation. In : SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA , 1°, Belo Horizonte , 1991.

[20] QUEIROZ, J. C. B. DE **Sistema especialista para tratamento de alarmes em um centro de supervisão e controle de um sistema elétrico.** Belo Horizonte , 1992. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.

[21] GOMI, E. S. **Inteligência artificial e programação em lógica, e suas aplicações nos sistemas de supervisão e controle de sistemas de potência.** São Paulo, 1989. 132 p. Dissertação(Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[22] VALE, A. Z.; MOURA, A. M. E. An expert system with temporal reasoning for alarm processing in power system control centers. **IEEE Transactions on Power Systems - v. 8 , n. 3 , p. 1307-14, Aug. 1993.**

[23] HEIN, F. Knowledge based alarm handling as additional tool for system operation. In : SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA , 3°, Belo Horizonte , 1992. **Artigos selecionados.** Belo Horizonte, CEMIG/ELETROBRÃS, 1992.

[24] HEIN, F. Expert system using pattern recognition by real time signals. In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS , 31, Paris, CIGRÉ, 1986. p. 39-10.

[25] TRAÇA-DE-ALMEIDA, A. Substation interlocking and sequence switching using a digital computer. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 100, n. 6, p. 3002-7, June 1981.

[26]BRAND, K. P.; KOPAINSK, J.; WIMMER, W. Topology-based interlocking of electrical substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 3, p. 118-26, July 1986.

[27] WOLLENBERG, B. .F. Feasibility Study for an Emergency Management System Intelligent Alarm Processors. **IEEE Transactions on Power Systems** v. 1, n. 2, p 241-7 , May 1986.

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

[29] TALUKDAR , S. N.; CARDOSO, E.; PERRY,T. The operator's assistant - an intelligent expandible program for power system trouble analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 3, p. 182-7, Aug. 1986.

[30] WOLLENBERG, B. F.; SAKAGUCHI, T. Artificial intelligence in power system operations. **Proceedings of the IEEE**, v. 75, n. 12, p. 1678-85, Dec. 1987.

[31] SCHULTE, R. P.; SHEBLE, G. B.; LARSEN, S. L.; WRUBEL, J. M.; WOLLEMBERG, B. F. Artificial intelligence solutions to power system operating problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 2, n. 4, p. 920-6, Nov. 1987.

[32] DIALYNAS, E. N.; MACHIAS, E. N. Interactive modelling of substation switching operations following a failure event. **IEE Proceedings**, Part C, v. 134, 2p. 153-6, Mar. 1987.

[33] STALDER, M.; GERMOND, A. J. An expert system in prolog for handling in a substation. In : POWER SYSTEM SPECIALIST COMPUTER CONFERENCE , Cascais, 1987, **Proceedings**. Lisboa, 1987, p. 973-8.

[34] CARDOSO, E.; TALUKDAR , S. N. A distributed expert system for fault diagnosis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 641-6, May 1988.

[35] MIHELCIC, M; GUBINA, F.; OGORELEC, A. An approach to power network fault location diagnosis. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 1°, Helsinki, 1988, **Proceedings**, Stockolm, p. 4-26/31.

[36] STALDER, M.; NIEBUR, D.; PALMIERI, L. GERMOND, A. J. A rule -based system for substations monitoring : the switching operations. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 1°, Helsinki, 1988, **Proceedings**, Stockolm, p. 6-1/8.

[37] BREZILLON , P.; FAUQUEMBERGUE, P. SEPT, an expert system approach for the monitoring of ehv substation control equipment. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 1°, Helsinki, 1988, **Proceedings**, Stockolm, p. 6-9/13.

[38] WONG, K. P.; CHEUNG, H. N. Artificial intelligence approach to load allocation in distribution substations. **IEE Proceedings**, Part C, v. 134, n. 5, p. 357-65, Sept., 1987.

[39] MONTRAVEL, G. ; ARRIETA, D. Pour les futures centres de conduite de réseaux eléctriques: une synthése des alarmes. **Revúe Generale d' Eletricité** , n. 1, p. 33-7, janvier 1989.

[40] PRINCE, W. R.; WOLLENBERG, B. F.; BERTAGNOLLI, D. B. Survey on excessive alarms. **IEEE Transactions on Power Systems,** v. 4, n. 3, p. 950-6, Aug. 1989.

[41] HEYDEMAN, J.; HARREWIJN, R. A knowledge based system for alarm reduction. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 2°, Seattle, 1989. **Proceedings**, Seattle, 1989, p. 96-100.

[42] BIJOCH, R. W.; HARRIS, S. H.; VOLKMAN, T. L. Intelligent alarm processor at northern states power. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 2°, Seattle, 1989. **Proceedings**, Seattle, 1989, p. 79-83.

[43] PURUCKER, S. L. ; TONN, B. E.; GELTZ, R. T.; WIGGEN, T. P.; HEMMELMAN, K. M.; BORYS, S. F.; RASMUSSEN, R. D. Design and operation of the communication alarm processor expert system . In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 2°, Seattle, 1989. **Proceedings**, Seattle, 1989, p. 40-5.

[44] ZHANG, Z. Z.; HOPE, G. S.; MALIK, O. P. A knowledge-based approach to optimize switching in substations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 103-9, Jan. 1990.

[45] ZHANG, Z. Z.; HOPE, G. S.; MALIK, O. P. Knowledge-based and integrated diagnosis in transmission substations. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 3°, Kobe, 1991. **Proceedings,** Tokio, 1991, p. 398-404.

[46] WANG, X; DILLON, T. A second generation expert system for fault diagnosis. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 3°, Kobe, 1991. **Proceedings,** Tokio, 1991, p. 751-5.

[47] PROTOPAPAS, C. A.; PSALTIRAS, K. P. An exper system for substation fault diagnosis and alarm processing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 2, p. 648-55, Apr. 1991.

[48] MCDONALD, J. R.; BURT, G. M.; YOUNG, D, J. Alarm processing and fault diagnosis using knowledge based systems for transmission and distribution network control. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 3, p. 1292-8, Aug. 1992.

[49] KUMANO, S.; ITO, H.; GODA, T.; UEBUKO,Y.; KYOMOTO, S.; KOUROGI,H.; ARIURA, Y. Development of expert system for operation at substation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 1, p. 56-65, Jan. 1993.

[50]RODRIGUEZ, C.; MARTIN, J. I.; RUIZ, C.; LAFUENTE, A.; REMENTERÍA, S.; PÉREZ,J,; MUGUERZA, J. Experimental comparison between knowledge-based and neural network approaches to fault diagnosis. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 4°, Melbourne, 1993. **Proceedings**, Melbourne, 1993, p. 387-92.

[51] YPSILANTIS, J.; YEE, H. Genetic learning applied to distribution system fault diagnosis and alarm processing. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS , 4°, Melbourne, 1993. **Proceedings**, Melbourne, 1993,p. 393-7.

[52] KAWAHARA, K.; ASAKARA, H.; SASAKI, H.; KUBOKAWA, J. Development of a supporting expert system for outage planning of power facilities. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS , 4°, Melbourne, 1993. **Proceedings**, Melbourne, 1993, p. 39-43.

[53] SHIRASAKI, T.; ENDO, T.; AOKI, T.; KINOSHI, T.; KAJIWARA,Y.; KATO, T.; UTSUNOMIYA, M. Development of power system outage scheduling system in

central dispatching center. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS , 4°, Melbourne, 1993. **Proceedings**, Melbourne, 1993, p. 44-9.

[54] GIBSON, G.; KITA, H.; NISHIYA, KI; HASEGAWA, J. Thermal power station maintenance scheduling based on fuzzy theory. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS , 4°, Melbourne, 1993. **Proceedings**, Melbourne, 1993, p. 50-5.

[55] KAMINARIS, S. D.; MACHIAS, A. V.; PAPADIAS, B. C. An intelligent tool for distribution susbstations troubleshooting and maintenance scheduling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.. 6, n. 3, p. 1038-44, July 1991.

[56] LEVI, R. ; RIVERS, M. Substation maintenance testing using an expert system for on-site equipment evaluation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, p. 269-75, Jan. 1992.

[57] PARAÍSO,E. C.; SILVA, M. L.; RAMOS, M. L.; KAESTNER, C. A. A. Sistema especialista em manutenção preditiva de equipamentos e plantas industriais. - VIDENTE In : SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 1°, Rio Claro, 1993 **Anais**. Rio Claro, UNESP/SBA, 1993, p. 96-104 .

[58] PEDERSEN, A.; REIN, P. Possible architetures of future control systems based on computer technique. In : CIGRÉ SYMPOSIUM ON DIGITAL TECHNOLOGY IN POWER SYSTEMS NEEDS-OPPORTUNITIES-IMPACT, Bournemouth, 1989, p. S 34-89 1A-01.

[59] KAWADA, H.; HASEGAWA, T.; OSE, K.; FUKUDA, T.; MUKAIYAMA, Y.; MORIGUCHI, S.; NOGUCHI, H.; ITTO, N. Present situation and future plans of operation and maintenance supporting system at substation. In : CIGRÉ SYMPOSIUM

ON DIGITAL TECHNOLOGY IN POWER SYSTEMS NEEDS-OPPORTUNITIES-IMPACT, Bournemouth., 1989, S 34-89 1A-06.

[60] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION Substation control and protection project. **Electric Power Research Institute** , 1981.

[61] KIRSCHEN, D. S.; WOLLEMBERG, B. F. Intelligent alarm processing in power systems. **Proceedings of the IEEE** , v. 80, n. 5, 1992.

[62] AMELINK, H,; FORTE, A. M. GUBERMAN, R. P. Dispatcher alarm and message processing . **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 3, p. 188-94, Aug. 1986.

[63] VADARI, S. V.; TYSON, F. D.; VENKATA, S. S. The issues of languages versus shells for expert systems applications to power systems. In : SECOND SYMPOSYUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 2°, Seattle, 1989. **Proceedings**, Seattle, 1989, p. 492-8.

[64] TOWSEND, C. **Técnicas avançadas em Turbo Prolog.** São Paulo , Campus, 1990.

[65] BORLAND INTERNATIONAL **Turbo Prolog 2.0** - user's guide. Scotts Valley, 1988

[66] BORLAND INTERNATIONAL **Turbo prolog 2.0.**- reference guide. Scotts Valley, 1988.

[67]BIHAN, P. **Turbo Prolog - an introduction to artificial intelligence.** Chichester, Jonh Wiley, 1987.

[68] SMITH, P. **Expert system development in prolog and Turbo-Prolog.** Wilmslow, Sigma Press, 1988.

[69] Borland International **Turbo Prolog toolbox.** Scotts Valley, 1987.

[70] SCHILDT, H. **Advanced turbo prolog** -version 1.1. Berkeley, McGraw-Hill, , 1987.

[71] MONARD, M. C., NICOLETTI, M. C. **Programas Prolog para processamento de listas e aplicações.** São Carlos, ICMSC-USP, 1993.

[72] CUGNASCA, C. E.; SARAIVA, A. M.; MASSOLA, A. M. A. Sistema digital de supervisão e telecomando de subestações. In : ENCONTRO LUSO-AFRO-BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO E EXPLORAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA , 1° , Porto, 1991. **Actas.** Porto, INESC, 1991. v.2, n.52.

[73] **NECESSIDADES básicas para automação de SE's em derivação.** São Paulo, CESP, 1992. Documento interno

[74] REIS, L. B.; TAHAN, C. M. V. Índice de mérito operativo para medir a qualidade de serviço de grandes subestações influenciada pela confiabilidade dos equipamentos. In : SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 11°, Rio de Janeiro, 1991, **Informes técnicos.** Rio de Janeiro, FURNAS, p. RJ/GSU/!16.1-6. Grupo VIII Subestações , 6 p.

[75] MACHIAS, A. V.; DIALYNAS, E. N.; PROTOPAPAS, C. A. An expert system approach to designing and testing substation grounding grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.4, n.1, p. 234-40, Jan. 1989.

[76] TORRES, G. L.; MUKHEDKAR,D. An expert system for AC/DC substation grounding design of a power system. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 2°, Seattle, 1989. **Proceedings**, Seattle, 1989, p. 194-99.

[77]ARIKUNI, K. et al. Use of an expert system applied to power equipment's fault diagnosis. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 3°, Kobe, 1991. **Proceedings,** Tokio, 1991, p. 602-8.

[78]FUSHIMI, T. et al. Turbine-generator on-line monitoring and diagnostic expert system. In : SYMPOSIUM ON EXPERT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 1°, Helsinki, 1988, **Proceedings**, Stockolm, p. 11-14/19.

[79] SUN, Y. et al. RETEX(relay testing expert): an expert system for analysis of relay testing data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.7, n.2, p. 986-94, jan. 1992.