

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**SISTEMA INTEGRADO DE OPERAÇÃO E
DIAGNÓSTICO DE FALHAS PARA SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA - S O D F**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção – Área de concentração: Inteligência Aplicada

WAGNER UBIRATAN LANZIERI DE AZEVEDO MAIA



0.292.717-6

FLORIANÓPOLIS - SANTA CATARINA - BRASIL
JULHO DE 1998



WAGNER UBIRATAN LANZIERE DE AZEVEDO MAIA

**SISTEMA INTEGRADO DE OPERAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE
FALHAS PARA SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA - S O D F**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

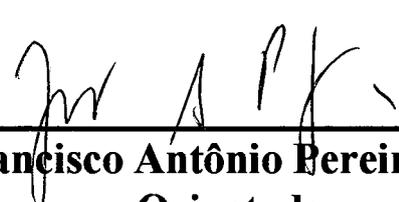
Mestre em Engenharia de Produção

Área de concentração em **Inteligência Aplicada** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação.



Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph. D.
Coordenador

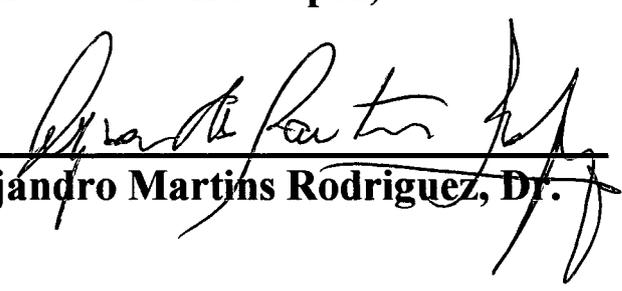
Banca Examinadora:



Prof. Francisco Antônio Pereira Fialho, Dr.
Orientador



Prof. Oscar Ciro López, Dr.



Prof. Alejandro Martins Rodriguez, Dr.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Ao Vice-almirante **João do Prado Maia**, pelo exemplo de probidade, espírito de luta e generosidade para com os seus semelhantes. Onde estiveres... o meu eterno agradecimento.

A **minha mãe**, pelo apoio e incentivo à minha carreira profissional.

AGRADECIMENTOS

Às **Centrais Elétricas do Sul do Brasil S/A – ELETROSUL**, por me liberar nos horários das aulas.

Ao Prof. Dr. **Francisco Antônio Pereira Fialho**, pela orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho, sem o que, esse sonho não se realizaria.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. **Oscar Ciro López** e Prof. Dr. **Alejandro Martins Rodriguez**, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com este trabalho.

Aos meus filhos **Alexandre** e **Luiz Gustavo**, pela compreensão, em virtude de minhas sucessivas ausências.

A minha filha **Ana Luiza** e a minha “*cara metade*” **Arlete**, por me proporcionarem o equilíbrio necessário.

Aos **autores** referenciados na bibliografia, cujo “*labor*” foi vital para a realização deste trabalho.

A todos os **amigos** que de uma forma ou de outra me ajudaram.

SUMÁRIO

Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de figuras.....	v
Lista de tabelas.....	vi
CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO.....	001
1.1. Introdução.....	001
1.2. Objetivo.....	002
1.3. Histórico.....	003
1.4. Estrutura do Trabalho.....	006
1.5. Conclusões.....	007
CAPITULO 2 - SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA	009
2.1. Arquitetura de um Sistema de Automação de Subestações de Energia Elétrica.....	009
2.2. A importância dos Protocolos de Comunicação na Automação de Sistemas de Energia Elétrica.....	015
2.3. Conclusões.....	019
CAPITULO 3 - SISTEMA ESPECIALISTA PARA A INTEGRAÇÃO DE OPERAÇÃO, SUPERVISÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	020
3.1. A Integração da Operação, Supervisão e Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Energia Elétrica.....	020
3.2. A Utilização de Sistemas Especialistas como Apoio a Decisão.....	021
3.3. Como Representar o Conhecimento.....	043
3.4. Modelagem do Protótipo SODF.....	047
3.5. Conclusões.....	093
CAPITULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	094
4.1. Implementação do Sistema Integrado de Operação e Diagnóstico de Falhas para Sistemas de Energia Elétrica.....	094
4.2. Descrição da Operação do Sistema.....	100
4.3. Modo Ajuda para o Apoio à Decisão.....	105
4.4. Conclusões.....	112

CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS	
TRABALHOS.....	113
5.1. Conclusões.....	113
BIBLIOGRAFIA.....	115

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade ensaiar a possibilidade da integração da Operação, Supervisão e Diagnóstico de Falhas de Sistemas de Energia Elétrica, a partir de um Sistema Especialista Híbrido, mostrando a implementação a partir de Regras de Produção de um módulo de “Ajuda”, onde o Sistema se propõe a ensinar o operador, com vistas a operação do sistema envolvido.

A implementação do módulo de Diagnóstico de Falhas com vistas ao apoio à decisão do operador, objetiva a integração de vários Sistemas Especialista, cujos programas executáveis deverão ser carregados a partir do sistema integrador. Na presença de uma falha, será levado a efeito a inferência a partir dos dados coletados na base de dados do sistema (SBD), chegando-se a uma possível causa partir da emulação do raciocínio humano por Sistemas Especialistas associados ao Sistema de Operação e Diagnóstico de Falhas - SODF. Esses Sistemas Especialistas auxiliares deverão ser desenvolvidos em uma etapa posterior.

O presente sistema deverá se prestar inclusive, com propriedade, para utilização como treinamento de novos operadores.

O trabalho não pretende implementar todas as funções básicas que um sistema de automação nesse campo de conhecimento requer, mas ele se propõe tão somente, a se somar aos demais em andamento e sobretudo, levar propostas e idéias que possibilitem contribuir para a obtenção de produtos mais interativos e inteligentes na área da Automação da Operação de Sistemas de Energia Elétrica.

É dada também uma visão geral do estado da arte das arquiteturas, protocolos e utilização de Sistemas Especialistas associados a automação de subestações, bem como os principais requisitos esperados de um sistema comercial de automação para subestações de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This work intends to show the possibility of integrating operation, supervision and failure diagnostic for Systems of electric energy through a hybrid specialist system. This system utilizes Production Base Rule Systems to implement the “Help” module which will teach the operator the proper ways to manage the system.

The implementation of the failure diagnostic, which was developed in order to give the system operator management support, aims at integrating the various specialist systems and the programs running under it

In the case of failure, an inference will be made based on the collected data from the system’s data base (SBD). This inference is developed by specialists systems associated to the operation system and failure diagnostics (SODF). This procedure was based on the human reasoning. These specialist systems such as the failure diagnostic will be further developed in subsequent work.

The present system may be used as training resource for new operators.

Although, this work does not intend to implement all basic functions required by an automation system in this area, it does not intend to adjoin other research in providing alternatives that may contribute for more intelligent and interactive products in this area.

In this work I describe the state of the arts of architecture, protocols and usage of specializing systems associated to sub-station automation, as well as the main requirements asked for in a commercial automation system to be used for Electric energy sub-stations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Arquitetura Típica de um Sistema SCADA.....	009
Figura 3.1 - Conceito Básico de um Sistema Especialista Baseado no Conhecimento.....	022
Figura 3.2 - Processo para Construção de um Sistema Especialista.....	024
Figura 3.3 - Conceitos Básicos para Concepção de Sistemas Especialistas.....	030
Figura 3.4 - Lei da Proximidade de Wertheimer.....	032
Figura 3.5 - Lei do Fechamento de Wertheimer.....	033
Figura 3.6 - Elementos Básicos Formadores de um Sistema Especialista.....	034
Figura 3.7 - Sumário de um Sistema Especialista Baseado em Regras de Produção.	042
Figura 3.8 - Relação Bidirecional Entre os Fatos e suas Representações Internas....	044
Figura 3.9 - Relacionamento Entre os Fatos, Representações Internas e Representação em Linguagem Natural.....	045
Figura 3.10- Mapeamento de Representações do Conhecimento.....	045
Figura 3.11- Arranjo Barra Singela - Disjuntor Singelo.....	049
Figura 3.12- Arranjo Barra Singela - Disjuntor Singelo Modificado.....	050
Figura 3.13- Arranjo Barra Principal e Transferência.....	051
Figura 3.14- Arranjo Barra Principal Dupla e Barra de Transferência.....	052
Figura 3.15- Arranjo Barra Principal Dupla e Barra de Transferência Modificado....	053
Figura 3.16- Arranjo Barra Dupla Disjuntor Duplo.....	054
Figura 3.17- Arranjo Disjuntor e Meio.....	055
Figura 3.18- Proteção e Medição de um Vão de Linha.....	056
Figura 3.19- Proteção e Medição de um Vão de Transformador.....	058
Figura 3.20- Teleproteção, ajustes das proteções.....	065
Figura 3.21- Teleproteção, ajustes das proteções.....	066
Figura 3.22- Teleproteção, esquema básico.....	066
Figura 3.23- Lay-out da Subestação.....	071
Figura 3.24- Diagrama Lógico DJ-732.....	075
Figura 3.25- Diagrama Lógico DJ-732.....	076
Figura 3.26- Diagrama Lógico DJ-752.....	078
Figura 3.27- Diagrama Lógico DJ-772.....	081
Figura 3.28- Diagrama Lógico CS-731 e CS-733.....	083
Figura 3.29- Diagrama Lógico CS-751 e CS-753.....	085
Figura 3.30- Diagrama Lógico CS-755.....	087
Figura 3.31- Diagrama Lógico CS-771 e CS-773.....	090
Figura 3.32- Diagrama Lógico CS-775.....	092
Figura 4.1 - Classes e Instâncias.....	097
Figura 4.2 - Tela de Entrada do Sistema.....	100
Figura 4.3 - Tela Principal do Sistema.....	101
Figura 4.4 - Tela Modo Ajuda.....	105
Figura 4.5 - Tela de Exemplo nº 1 do Modo Ajuda.....	106

Figura 4.6 - Tela de Exemplo nº 1 do Modo Ajuda.....	108
Figura 4.7 - Tela de Exemplo nº 1 do Modo Ajuda.....	109
Figura 4.8 - Tela de Exemplo nº 2 do Modo Ajuda.....	110
Figura 4.9 - Tela de Exemplo nº 2 do Modo Ajuda.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Um Exemplo de Algoritmo de Markov.....	041
Tabela 3.2 - Tempo Requerido Para os Eventos.....	048
Tabela 3.3 - Funções de Relês.....	057
Tabela 3.4 - Funções de Relês.....	059
Tabela 3.5 - Funções de Relês.....	062
Tabela 3.6 - Tempo de Transmissão dos Principais Esquemas de Teleproteção.....	067
Tabela 3.7 - Quadro Demonstrativo de Composição de Módulos.....	072
Tabela 3.8 - Tabela de Operação do Disjuntor 732.....	074
Tabela 3.9 - Tabela de Operação do Disjuntor 752.....	077
Tabela 3.10- Tabela de Operação do Disjuntor 772.....	079
Tabela 3.11- Tabela de Operação das Chaves Seccionadoras 731 e 733.....	082
Tabela 3.12- Tabela de Operação das Chaves Seccionadoras 751 e 753.....	084
Tabela 3.13- Tabela de Operação da Chave Seccionadora 755.....	086
Tabela 3.14- Funções de Relês.....	088
Tabela 3.15- Tabela de Operação das Chaves Seccionadoras 771 e 773.....	089
Tabela 3.16- Tabela de Operação da Chave Seccionadora 775.....	091
Tabela 4.1 - Tabela dos “Slot’s”.....	098
Tabela 4.2 - Tabela de Funções.....	099
Tabela 4.3 - Tabela de Regras de Produção.....	099
Tabela 4.4 - Tabela de Descrição dos Botões.....	102

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

O caminho que leva a reestruturação do setor elétrico é um fato consumado, face a necessidade de investimento no setor, objetivando a garantia da quantidade, qualidade e preços adequados do produto Energia Elétrica.

Com a abertura do setor elétrico, o mesmo deverá se sujeitar as leis de mercado, havendo a necessidade de ajustes nos mais variados níveis, para a manutenção de um produto que atenda as aspirações de um mercado consumidor cada vez mais exigente e progressista.

Para a compatibilização dos interesses dos consumidores e do empresariado da geração de energia elétrica, em especial os da iniciativa privada, bem como regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização da eletricidade no Brasil, foi instituída a 26 de dezembro de 1996, a lei 9427, que cria a *ANEEL* - Agência Nacional de Energia Elétrica, uma autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energia, a qual substitui o *DNAEE* - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica [3].

A crescente necessidade do crescimento da malha das redes de transmissão e distribuição de Energia Elétrica e o aumento de sua complexidade aliada aos novos requisitos do produto “Energia Elétrica” exigidos pelas indústrias de ponta, vem a requerer Sistemas de Operação, Supervisão e Controle cada vez mais complexos, exigindo cada vez mais dos recursos humanos de operação, análise e manutenção desses sistemas.

A complexidade crescente do sistema resultante, aliada à dificuldade na contratação de pessoal especializado, bem como, a competitividade que exigirá a formação de pessoal de operação e supervisão em tempo cada vez mais exíguo, acarretará na necessidade da concepção de sistemas de operação e supervisão mais inteligentes.

Sistemas de operação e supervisão inteligentes podem ser capazes inclusive da redução do tempo de formação dos profissionais da área, e simultaneamente, minimizam os erros de operação e possibilitam inclusive a redução do tempo gasto em análise para a obtenção dos diagnósticos das falhas, sem o incremento significativo de investimentos.

Atualmente são crescentes os investimentos no sentido da automatização dos complexos associados aos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. Esse fato levou as empresas do setor à elaboração de seus Planos de Digitalização, iniciativa essa com o objetivo de prover a transição do seu parque instalado, da era analógica para a era digital.

Se por um lado a transição de tecnologia de um parque instalado, levado a efeito em função de exigências externas, sob os aspectos de custos e inconveniências conseqüentes de sua implantação, são traumáticas, maiores serão as dificuldades que advirão pela necessidade da mudança relativa a cultura analógica para uma cultura digital, e posteriormente para uma cultura automatizada.

Como as mudanças tecnológicas são muito mais rápidas do que as mudanças possíveis no comportamento dos seres humanos envolvidos com a operação, supervisão e manutenção dos sistemas de produção de energia elétrica, é muito importante que os sistemas a serem implantados nas culturas tecnológicas emergentes levem em conta não somente os ganhos que a tecnologia trará para o sistema e produto final, mas, não pode ser desconsiderado que os resultados somente serão os esperados se o sistema a ser implantado seja amigável o suficiente para ser operado pelas pessoas que remanescem da cultura analógica e que atravessam as dificuldades inerentes ao provisionamento da sua atualização de conhecimento e *modus-operandi*.

1.2. OBJETIVO

Para o atendimento das necessidades comentadas, idealiza-se ***um Sistema Integrado de Operação Supervisão e Controle***, que possibilite, além das funções referentes a operação convencional dos sistemas, como controle e supervisão, a possibilidade de se fazer o diagnóstico das falhas possíveis, dando ao operador subsídios para as tomadas de decisões, como também, onde possível, e através de procedimentos interativos, possa bloquear os comandos errados, corrigir e até mesmo ensinar o operador, quando da ocorrência de procedimentos incorretos.

Esse trabalho mostra a viabilidade do desenvolvimento de um Sistema Especialista voltado à integração da operação, supervisão e diagnósticos de falhas de sistemas de Energia Elétrica, o qual viria a colaborar para a redução do tempo de eliminação de defeitos em função da rápida localização e possível diagnóstico das falhas no sistema, minimização dos erros de manobras pela possibilidade de automatização de rotinas de comandos e interação com o sistema, e em um estágio mais avançado, por que não a concepção de um sistema que junte as vantagens enumeradas com a possibilidade de “ensinar” o operador neófito a lidar com o sistema, de modo interativo e amigável, possibilitando como conseqüência, a utilização de operadores não tão especializados, dando inclusive a possibilidade do sistema ser operado por “não especialistas” e/ou ser utilizado indistintamente como unidade de treinamento de operadores, podendo funcionar em paralelo com sistemas atualmente no mercado.

O Protótipo Implementado trata-se de uma modelagem acadêmica, portanto não serão implementadas todas as funções necessárias, mas tão somente algumas, de forma suficiente a que possamos demonstrar a viabilidade do Sistema Especialista para o fim a que aspiramos.

1.3. HISTÓRICO

As empresas de Energia Elétrica tem envidados esforços com vistas a repotencialização de seu parque de transmissão, objetivando operá-los no limite de suas capacidades, com a segurança e confiabilidade requerida, em virtude da aceleração do consumo de energia elétrica, agravada a dificuldade no que tange a obtenção de recursos de investimentos. Assim, a utilização de sistemas digitais de supervisão e controle, juntamente com a implementação de sistemas de automação, tem contribuído significativamente para a melhoria da qualidade de atendimento, proporcionando recursos não só de manobra remota de equipamentos, mas também para a manipulação de grandes quantidades de informações, de maneira prática, racional e segura. A supervisão das condições dos equipamentos elétricos, possibilita uma melhor e mais confiável utilização dos mesmos, ao mesmo tempo em que contribui para uma maior racionalização das rotinas de manutenção, garantindo assim, além da economia resultante, uma sobrevida aos equipamentos, sem prejuízo da sua qualidade.

A automação de subestações é obtida pela utilização criteriosa de módulos de hardware, software, transdutores e sensores, de forma a se conseguir a funcionalidade desejada. A integração desses equipamentos digitais é comumente denominada de Sistema Digital de Supervisão e Controle, ou seja, sistema SCADA.

A principal função do sistema SCADA é a monitoração e o controle dos equipamentos. Existem vários níveis possíveis de consistência e tempo de resposta dessas funções, bem como a possibilidade de incorporação de funções complexas, as quais deverão ser avaliadas segundo uma relação custo/benefício associada. A implementação do sistema deve ser iniciada com o levantamento dos requisitos das funções a serem automatizadas, seguida pela definição da arquitetura de hardware e software. Nessa fase é muito importante a análise da compatibilidade entre os vários módulos para a sua perfeita integração.

Um sistema digital de automação de subestações, geralmente apresenta as seguintes funções básicas:

Função monitoração:

deve permitir apresentar ao operador, graficamente ou através de desenhos esquemáticos, os valores provenientes das medições realizadas, além das indicações de estado dos disjuntores, chaves seccionadoras e demais equipamentos de

interesse. As medições podem ser obtidas por meio de transdutores conectados às entradas analógicas de unidades terminais remotas ou controladores programáveis, ou ainda através de equipamentos dedicados que promovam a transdução analógico/digital.

Função proteção:

em vista de sua importância e velocidade de atuação necessária, esta função é realizada por equipamentos autônomos e redundantes. Os relês de proteção podem ser digitais ou convencionais, sendo que esses últimos podem ser eletromecânicos ou de estado sólido.

Cabe ao sistema de automação apenas monitorar a atuação dos relês, que no caso dos relês convencionais, é efetuada por meio de contatos auxiliares. Já os relês numéricos apresentam a possibilidade de transferência dessa informação via canal de comunicação de dados, além de poderem transferir adicionalmente o estado operativo do relê, por meio de rotinas de autodiagnóstico.

Comando remoto:

a manobra dos equipamentos deverá ser conduzida pelo operador a partir da sala de comando, através da interface gráfica onde é apresentado o diagrama da subestação, estando essa sala de comando na própria subestação ou em um Centro Remoto de Operação, em caso de subestações desassistidas.

Alarmes:

deve notificar o operador da ocorrência de alterações espontâneas da configuração da malha elétrica, a irregularidade funcional de algum equipamento ou do sistema digital ou ainda a ocorrência de transgressões de limites operativos de medições. A ocorrência de uma situação de alarme deve obrigar o operador a desempenhar um procedimento de reconhecimento do

mesmo.

Armazenamento de dados históricos:

todas as medições, indicações de estado, alarmes e ações do operador devem ser armazenados, a fim de permitir a análise pós-operativa.

Gráficos de tendências:

devem possibilitar ao operador observar a evolução das grandezas analógicas no tempo.

Intertravamento:

devem efetuar o bloqueio ou liberação de ações de comando em chaves, disjuntores ou seccionadoras em função da topologia da subestação, visando à segurança operativa desses equipamentos.

Registro seqüencial de eventos:

deve registrar a atuação de relês de proteção, abertura e fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras e outras indicações de estado de interesse, com precisão de até um milisegundos, de forma a possibilitar o encadeamento histórico das ocorrências. Devido à elevada precisão, a aquisição desses dados é efetuada normalmente por equipamentos autônomos, que se comunicam com o centro de controle e demandam um dispositivo de sincronização de tempo.

Religamento automático:

é um algoritmo de controle que tenta restabelecer automaticamente a topologia da subestação no caso de abertura espontânea de disjuntor.

Controle de tensão e reativos:

é uma lógica de controle que visa manter o nível de tensão e o fluxo de reativos nos barramentos, dentro de limites preestabelecidos, através da alteração automática de "tapes" de transformadores e a inserção ou retirada parcial ou total de banco de capacitores.

Complementando os requisitos funcionais, o sistema digital de automação deverá ainda oferecer as seguintes facilidades:

Interface homem máquina amigável (IHM):

a IHM deverá oferecer recursos gráficos de animação que permita ao operador pouco familiarizado com informática, reconhecer de imediato os estados dos equipamentos, as medições realizadas e as sinalizações de alarmes.

Subestações desassistidas:

devem permitir que a subestação opere sem a presença do operador, sendo que nesse caso, sua operação passará a ser efetuada remotamente de um centro regional. Assim, o sistema deverá redirecionar as informações do console local para um console remoto, através de canal de comunicação de dados.

Diversidade de equipamentos:

a integração com equipamentos de aquisição de dados e controle, como Unidades de Transmissões Remotas - UTR's e Controladores Programáveis - CP's, equipamentos de medição digital e relês digitais, provenientes de diferentes fornecedores, deve ser facilitada.

Interligação em rede:

o sistema deverá apresentar facilidades de utilização em rede de forma a permitir a integração futura de outros módulos.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 é feito um histórico da realidade brasileira do Sistema Elétrico Interligado, mostrando as tendências ora sendo seguidas pelas empresas que a integram, bem como é comentado sobre os esforços sendo levado a efeito nessas organizações com vistas a modernização de seu parque gerador e de transmissão. São também mostradas as justificativas que tornam interessante a implementação de Sistemas Especialistas voltados para a operação, supervisão e diagnóstico de falhas de Sistemas de Energia Elétrica.

No capítulo 2 é mostrado o atual estado da arte no que diz respeito as arquiteturas utilizadas para a implementação de sistemas de automação de subestações de energia elétrica e a importância que os protocolos de comunicações assumem para sistemas de processamento distribuído.

No capítulo 3 são abordados os aspectos referentes a integração da operação, supervisão e diagnóstico de falhas com a utilização de Sistemas Especialistas e sua utilização com apoio a decisão. São esplanados os aspectos teóricos relevantes sobre a representação do conhecimento. É modelado um protótipo de um Sistema de Operação e Diagnóstico de Falhas para sistemas de energia elétrica.

No capítulo 4 o protótipo é implementado, com ênfase para a função intertravamento, uma vez que o aplicativo se propõe a ser um sistema integrador de vários outros Sistemas Especialistas, tendo como função primeira a operação do sistema de energia elétrica associado.

No capítulo 5 são mostradas as conclusões e as sugestões para os futuros trabalhos a serem desenvolvidos nesse campo de conhecimento.

1.5. CONCLUSÕES

O sistema elétrico brasileiro vive um período de transição que vai desde o processo de privatização à migração tecnológica de seu parque instalado, passando pela repotencialização de seu sistema com vistas a otimização do custo benefício de suas instalações.

A grande abrangência do universo de desenvolvimento de Sistemas Especialistas voltados para a operação de Sistemas de Energia Elétrica e ainda o aspecto referente a própria definição de Sistemas Especialistas, os quais devem ser voltados para a solução de problemas específicos (como o próprio nome sugere) nos mostra que o caminho é a integração de soluções particulares, cujos resultados devem culminar com um produto que possibilite a operação desses sistemas de forma amigável, com a redução do nível de especialização requerido para o operador. Com vistas ao atingimento desses objetivos, optamos pela implementação de um módulo de sistema que visa a automatização via *software* da função intertravamento de uma Subestação de Energia Elétrica, possibilitando adicionalmente, o recurso *on-line* de interação com o operador, exteriorizando quando solicitado, os passos necessários para a correta operação da subestação, considerando sobretudo o estado *on time* dos equipamentos e dispositivos envolvidos no processo.

O corpo funcional associado à operação dos sistemas de energia elétrica, possui um tempo relativamente longo para adquirir a experiência necessária para o exercício de suas atividades com a segurança requerida. Assim, esse módulo pode inclusive se prestar para o treinamento de futuros operadores de subestações.

A utilização de um Sistema Especialista voltado à operação, supervisão e controle de sistemas de energia elétrica, que faça a integração de outros sub-sistemas especialistas que se proponha a funcionar associado aos sistemas de automação existentes no mercado é um recurso que objetiva a redução do tempo de maturação dos profissionais, como também poderá dotar a operação, de sistemas mais inteligentes, com a utilização de técnicas de Inteligência Artificial.

Capítulo 2: SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

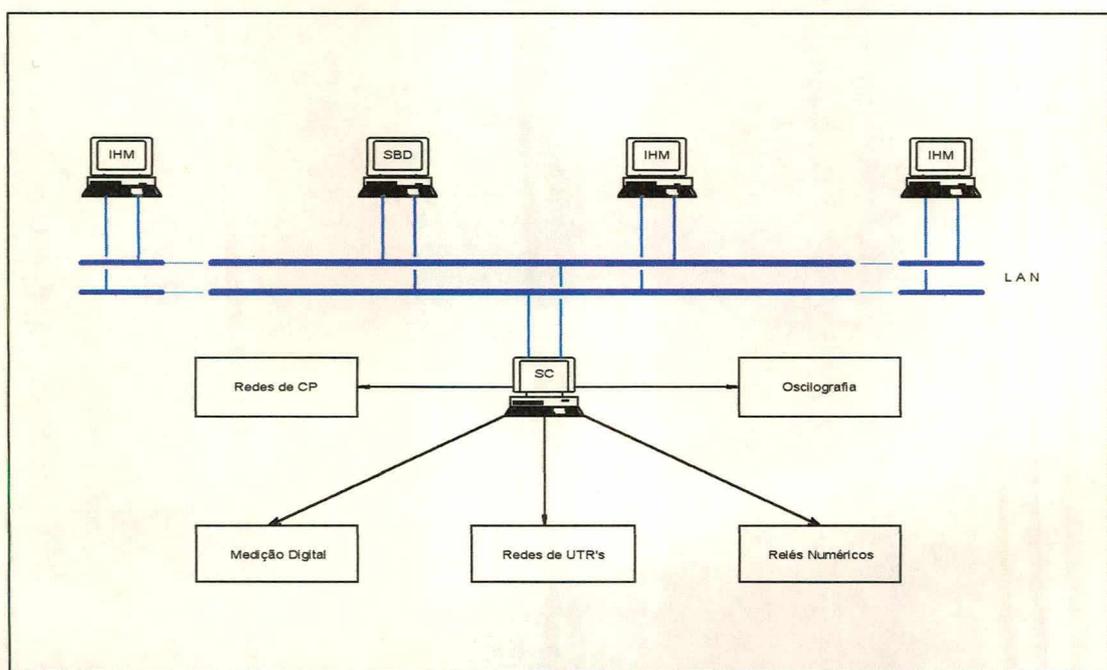
2.1. ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

A arquitetura de *Sistemas Abertos* vem de encontro a necessidade da atualização de sistemas com equipamento de baixo custo e elevada performance levada a efeito pela rápida evolução da tecnologia e dos requisitos exigidos pelos sistemas associados.

Arquiteturas de sistemas abertos são baseados em sistemas de processamento distribuído formado por uma rede de máquinas funcionalmente independentes em termos de *hardware* e *software*, mas que seguem normas e interfaces padrões de forma a garantir a portabilidade, interoperabilidade, escalabilidade e interconectividade entre elas [1].

A arquitetura aberta de um sistema SCADA típico é funcionalmente constituído de módulos interligados por uma rede dual de elevado desempenho, conforme figura abaixo:

Figura 2.1 – Arquitetura típica de um sistema SCADA



Nestas arquiteturas, as informações coletadas pelas unidades de aquisição e controle (UAC) são colocadas na rede de comunicação, a disposição dos demais membros da rede, onde o servidor de banco de dados (SBD) zelará pelo armazenamento e disseminação seletiva das informações. A interação do operador com o sistema se faz por meio dos servidores de interface homem-máquina e a comunicação, tanto com os equipamentos de campo, quanto com os níveis hierárquicos superiores, é efetuada pelo servidor de comunicação (SC).

Dependendo da aplicação, esses módulos podem ou não ser redundantes ou ainda ter suas funções concentradas num único *hardware*. Assim, por exemplo, uma subestação com poucos pontos de supervisão e controle pode não necessitar de servidores de banco de dados redundantes e ainda vários servidores de IHM. Nesse caso o próprio “hardware” que executa as funções de servidor de IHM pode executar também as funções de servidor de banco de dados e, eventualmente, poderá também acumular as funções de servidor de comunicações.

A adição de novas funções como Sistemas Especialistas, módulos ou mesmo consoles do sistema SCADA, é facilitada pelo uso de interfaces padronizadas, permitindo que o sistema seja projetado de forme modular.

Os servidores de interface homem-máquina são máquinas equipadas com um ou mais monitores de vídeo colorido de alta resolução, impressora gráfica, teclado alfanumérico e *mouse*, atuando como console de operação. O console de operação proporciona ao operador todas as facilidades necessárias ao comando e supervisão da subestação, possibilitando a execução das seguintes atividades:

- supervisão do sistema elétrico da subestação.
- execução do controle remoto de disjuntores e relês de bloqueio.
- comando remoto dos *tapes* de transformadores equipados com comutadores.
- controle remoto do nível de reativos e de tensão nos barramentos da subestação.
- inibição das ações de controle em determinados equipamentos.
- supervisão da atuação dos relês de proteção convencional e digital.
- alteração das curvas de atuação dos relês digitais.
- reconhecimento, silenciamento e inibição de mensagens de alarmes.
- acesso a todas as telas de diagramas unifilares, tabulares e de tendências.
- substituição manual de grandezas telemedidas e calculadas.
- impressão *hardcopy* das telas e relatórios operacionais.

A rede de comunicação, por sua vez, deve permitir a inclusão de vários consoles de operação, não devendo haver nenhuma restrição quanto à configuração das mesmas. A quantidade e localização dos consoles é estabelecida pelas necessidades da aplicação e, dependendo do meio físico da rede, existe ainda a possibilidade de se instalarem consoles remotos a uma distância relativamente grande, sem perda de desempenho.

Nos servidores IHM encontra-se uma base de dados local, onde são armazenados, por exemplo, a parte estática das telas gráficas e a base de dados de tempo real.

Existem no mercado vários pacotes para o suporte de interfaces gráficas para sistemas de automação, baseados em diferentes sistemas operacionais e conseqüentemente, com níveis diferentes de recursos. Essa diversidade de produtos vem contribuindo para dificultar a portabilidade de aplicações entre produtos de diferentes fornecedores, além de obrigar o treinamento adicional de operadores, de modo a capacitá-los a operar interfaces gráficas de diferentes origens.

O IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* está desenvolvendo um trabalho de normalização das interfaces apresentadas por sistemas operacionais, denominado *Posix Portable Operating System Interface* [2]. O Posix recomenda a utilização de interfaces gráficas baseadas no *X-Windows*, que foi desenvolvida pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology), visando criar uma interface independente do tipo de *hardware* e sistema operacional utilizado e, desta forma, ampliar o universo de usuários. Porém, não podemos esquecer os aplicativos que baseiam-se em produtos que se consagraram juntos aos usuários, se constituindo em padrões mercadológicos, como o MS- Windows e o OS/2.

Os Servidores de Banco de Dados (SBD) armazenam a base de dados de tempo real e histórica, além de arquivos de seqüência de eventos, valores de ajuste de relês de proteção, dados cadastrais de equipamentos, etc. Para tanto, são utilizados máquinas velozes, de alta capacidade de armazenamento, muitas vezes em configuração dual por se tratar de uma função crítica para a operação do sistema.

Para gerenciar a base de dados distribuída, normalmente é utilizado um “software” comercial aderente aos padrões internacionais e de grande penetração no mercado. Entretanto, para que as aplicações desenvolvidas possam ser consideradas abertas, é necessário que o sistema gerenciador da base de dados (SGBD) siga padrões escritos e mantidos por organizações independentes internacionais. Para os bancos de dados de estrutura relacional, foi padronizada uma linguagem de consulta denominada SQL - *Structured Query Language*, objetivando prover portabilidade de definição de bancos de dados, bem como de programas aplicativos entre bancos de dados provenientes de diferentes fornecedores.

Para aplicações críticas em termos de desempenho, o SGBD deve possibilitar também a integração de módulos escritos em linguagem de alto nível (geralmente “C”), que efetuem o acesso à base de dados por meio de biblioteca de funções geralmente desenvolvida pelo fabricante.

Os gerenciadores das bases de dados comerciais não foram desenvolvidos para operarem em tempo real, restrição que pode ser contornada pela adoção de máquinas de alto desempenho, bem como o uso de algumas simplificações no tratamento dos dados, evitando gargalos no processamento no caso de avalanche de informações.

Os servidores de comunicações de dados (SC) estabelecem a comunicação da subestação com os níveis hierárquicos superiores, podendo inclusive servir de interface para as UAC's que não tem possibilidade de comunicação direta com a rede.

Os servidores de comunicação podem ser equipados com vários canais de comunicação e cada um deles é tratado independentemente dos demais. Cada um desses canais pode operar com protocolo de comunicação diferente, de acordo com as necessidades dos níveis hierárquicos superiores e inferiores. Em sistemas de pequeno porte, o servidor de IHM pode acumular também a função de servidor de comunicação.

Os servidores de comunicação podem aliviar o carregamento do subsistema computacional central, podendo executar conversão de protocolos proprietários para o protocolo padrão utilizado na rede local (LAN), bem como efetuam o controle de seqüências de varreduras de rotina, os testes de não-resposta, a detecção de erros de comunicação, a verificação de mudança de estado e a execução de outras funções de rotina.

Tendo em vista a inexistência de um protocolo de comunicação universal que atenda às necessidades de comunicação de todos os equipamentos inteligentes instalados numa subestação, os servidores de comunicação abrigam simultaneamente vários tipos de protocolos, que podem fazer uso de diferentes meios físicos de transmissão de dados.

Dadas as peculiaridades dos requisitos de comunicação, é concentrada no servidor de comunicação a comunicação com os equipamentos de campo, tais como: relés digitais, equipamentos de medição digital, controladores programáveis, unidades terminais remotas e equipamentos de oscilografia. Este módulo responde, ainda, pelas necessidades de comunicações com os níveis hierárquicos superiores, tais como COS (Centro de Operações do Sistema), COR (Centro de Operações Regionais), COD (Centro de Operações de Distribuições) etc., pois este tipo de comunicação pode envolver protocolos destinados às *Wide Area Networks* (WAN's).

A comunicação de dados desempenha também um papel de destaque dentro do próprio sistema computacional central em arquiteturas abertas, que exploram o processamento distribuído, formado por uma rede de máquinas independentes. Se por um lado essa arquitetura maximiza a portabilidade de "software" e independência de plataformas, por outro, obriga o sistema a ser capaz de gerenciar essa rede de nós independentes de tal forma que a segurança, controle de compartilhamento e redundância dos dados sejam mantidos em tempo real, além de atender aos requisitos de desempenho e resposta especificados.

O incessante desenvolvimento de novas tecnologias para comunicação de dados e o aperfeiçoamento das existentes tem gerado uma quantidade de protocolos para cada um dos níveis de comunicação identificados nas subestações. As entidades internacionais tem procurado recomendar aqueles que se demonstram mais adequados às características do processo, podendo-se vislumbrar uma certa orientação do mercado em torno de alguns protocolos.

Para o nível hierárquico superior, isto é, comunicação com centros de controle, o EPRI *Electric Power Research Institute*, dos EUA, está recomendando o protocolo ICCP - *Inter-control Center Communications*. Já para o nível de comunicação entre os módulos constituintes do sistema computacional distribuído, tem-se o TCP/IP – *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* e o FDDI – *Fiber-Distributed Data Interface*, com grande probabilidade de se firmarem, enquanto para a comunicação em nível de campo o IEEE está recomendando o IEC 870 e o DNP (*Distributed Network Protocol*).

As unidades de aquisições e controle (UAC's) são microcomputadores de características robustas, encarregadas de efetuar a interface com o processo e a coleta de dados com periodicidade preestabelecida, bem como acionar remotamente algum dispositivo. Apresentam ainda a capacidade de processamento local. Para tanto, esses microcomputadores devem ser capazes de operar em ambientes hostis, com baixa taxa de falhas.

As UAC's normalmente se interligam com o sistema de monitoração e controle através de uma interface de comunicação, tais como, modem, saída serial, saída RS485 ou rede tipo Ethernet. Esta facilidade permite que operem em rede, que em muitos casos é proprietária, mas quase sempre oferecem *gateways* para protocolos abertos.

A transmissão dos dados pode ser efetuada *por exceção*, isto é, para minimizar o tráfego de mensagens, são enviadas apenas as alterações ocorridas nas indicações de estado e nas medidas lógicas, detectadas após a transmissão completa que acontece no momento em que a UAC entrou em operação.

Atualmente, a maior parte das UAC's comercializadas incorporam rotinas de autodiagnóstico, que monitoram continuamente o funcionamento do *hardware* e do *software*, reportando qualquer anormalidade. A sinalização das falhas pode ser local, através de lâmpadas indicativas, ou mesmo enviando mensagem ao sistema SCADA, via rede de comunicação de dados.

O termo UAC representa indistintamente vários tipos de equipamentos existentes, tais como: CP's, UTR's, medidores digitais, relês de proteção digital, sequenciadores de eventos, osciloperturbógrafos, etc.

Inicialmente, fazia-se distinção entre remotas e controladores programáveis, tendo em vista que o *software* dos CP's operava ciclicamente, sem controle de tempo de execução das tarefas. Além disso, a linguagem de programação de relês impossibilitava a execução de tarefas mais complexas. Com a evolução dos CP's, os modelos mais recentes já incorporam escalonador de tarefas com tratamento de interrupções[2].

Embora a maioria dos CP's funcionalmente fossem equivalentes e programados através de linguagem de diagramas de relês (RLL), havia diferenças entre os fabricantes o que dificultava a portabilidade dos programas desenvolvidos. A tentativa de prover ambiente de programação uniforme, a fim de reduzir esforços e custos de treinamento, motivou a criação do padrão IEC

1131 que, embora não explicita a portabilidade como meta, padroniza no seu volume 3 as linguagens de programação. Devido à peculiaridade dos vários processos industriais, essa norma estabelece cinco linguagens de programação, a saber: *Instruction List (IL)*, *Ladder Diagram (LD)*, *Function Block Diagram (FBD)*, *Sequential Function Chart (SFC)* e *Structures Text (ST)*.

Outras organizações, como o *P.L.C. Open*, também focalizam a sua atuação no ambiente de programação estabelecendo regras de sintaxe e semântica, além de obrigar a que todos os seus membros se comprometam a fazer uso e comercializar sistemas aderentes a IEC 1131.

Uma revolução na arquitetura das UAC's está sendo levada a efeito pela redução de preços, aliada à facilidade de incorporação de portas de comunicação em dispositivos eletrônicos inteligentes (IED), de forma que a própria UAC passa a ser distribuída, constituída de módulos menores interligados por uma rede de comunicação de dados. Assim, esses módulos menores podem ser instalados estrategicamente dentro de uma subestação, visando minimizar o custo de cablagem. Uma UAC atuando como concentradora faz a ponte entre o sistema SCADA e a rede de sub-UAC's.

Outros dispositivos inteligentes que tenham canais de comunicação de dados (medidores digitais, relês numéricos, controladores programáveis e outros tipos de IED) podem ser ligados diretamente à UAC concentradora que se encarrega das conversões de protocolos, diminuindo dessa forma o volume de protocolos diferentes a ser tratado pelo servidor de comunicação (SC) do sistema SCADA.

Numa subestação automatizada, os relês de proteção digitalizados ou convencionais devem ter suas ações monitoradas continuamente. Enquanto os relês convencionais necessitam de uma UAC conectada aos seus contatos de *trip* ou de relês auxiliares multiplicadores de contato para que possam ser supervisionados, os seus similares digitais fornecem essa informação através de rede de comunicação de dados. Adicionalmente, fornecem ainda valores de tensão e/ou corrente de defeitos. Além dessas informações, os relês de proteção digital também incorporam as funções de medição de tensões e correntes das fases, sem a necessidade de uso de transdutores, além da oscilografia e seqüência de eventos, dispensando, na maioria das vezes, a utilização de UAC.

Os relês microprocessados são também equipados com rotinas de auto-diagnóstico que testam continuamente o seu *hardware*, sinalizando a ocorrência de mau funcionamento de algum componente tanto localmente, como também por meio de linha de comunicação de dados.

Uma outra facilidade que distingue os relês numéricos é a possibilidade de parametrização remota ou local, permitindo assim a implantação de algoritmos de proteção adaptativa, onde a parametrização do relê é alterada automaticamente pelo sistema SCADA, em função de condições operativas ou mesmo do *layout* da subestação.

Os equipamentos medidores microprocessados efetuam continuamente a medição dos valores de tensão e corrente nas fases, conectados diretamente aos TC's e TP's, dispensando a utilização de

transdutores analógicos convencionais. Alguns equipamentos calculam a partir das grandezas medidas, a energia ativa e reativa e muitas vezes também a demanda. Muitos equipamentos que efetuam o cálculo da demanda incorporam também portas de entrada e saída digitais, habilitando-as a serem programadas para efetuar o corte automático de carga, a fim de não permitir a transgressão de limites pré-definidos. Certos fabricantes fazem a amostragem da forma de onda com elevada resolução, de formas a possibilitar também a análise harmônica. Analogamente aos relés digitais de proteção, os equipamentos digitais de medição podem ser ligados em rede com o sistema SCADA, transferindo continuamente, as medições realizadas, bem como recebendo ajustes de fator de escala e demais parametrizações.

2.2. A IMPORTÂNCIA DOS PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO NA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

É importante frisarmos a importância que a comunicação de dados assume para uma arquitetura distribuída, haja visto que ela dimensiona a modularidade dos sistemas, o que não se tem conseguido com muito sucesso atualmente em função da grande quantidade de protocolos de comunicação proprietários no mercado associados aos mais variados aplicativos os quais não obedecem a padrões de domínio público.

A interoperabilidade é um dos requisitos importantes, por possibilitar a dois ou mais sistemas trocarem informações, gerando dessa forma, uma certa independência de um determinado fornecedor. Para que esse requisito seja verdadeiro, é necessário o estabelecimento de padrões de Protocolos de Comunicação, o qual é composto pelas interfaces e meios de conexão entre os sistemas em nível físico (interface elétrica e mecânica) e em nível lógico (protocolo de acesso ao meio, protocolo de enlace, protocolo de rede, protocolo de transporte, protocolo de sessão e protocolo de aplicação).

A utilização de um protocolo de comunicação baseado em normas ou padrões de aceitação geral (domínio público) vem a possibilitar a independência de um determinado aplicativo.

O passo dimensionante para que um protocolo se torne um padrão é a sua especificação se tornar pública e sustentada por um fórum independente e autônomo que reúna todas as classes de interessados (fornecedores, usuários, consultores, certificadores, etc.). Para o atendimento a essa necessidade, está sendo introduzido o *Distributed Network Protocol (DNP 3.0)*, com vistas a suprir as necessidades de comunicação em sistemas tipo mestre-escravo aplicados no processo de supervisão e controle do setor de energia elétrica.

O DNP 3.0 é baseado na norma internacional IEC 870-5, que define um protocolo de comunicação de três camadas (modelo EPA - *Enhanced Performance Architecture*, de acordo

com o modelo OSI - *Open System Interconnection* da ISO - *International Standardization Organization*, orientados a equipamentos e sistemas de controle.

O DNP foi inicialmente desenvolvido pela *Harris Controls Division Distributed Automation Products*, dos EUA, em novembro de 1993, e sua especificação foi transferida para um grupo de usuários que, a partir daquele momento, passou a ser proprietário e responsável pelas suas futuras revisões. Assim, o DNP tornou-se um protocolo aberto e público, o que possibilita a sua adoção como um padrão.

As características listadas a seguir torna o DNP um protocolo aplicável a arquiteturas abertas de sistemas distribuídos associados a área de energia elétrica:

Transferência de blocos de dados:

suporta a transferência de blocos de dados com até 2 kbytes, através das funções da camada de transporte. Esta capacidade permite a transferência de tabelas de configuração, informação de prioridades e algoritmos de controle entre o mestre e os escravos.

Tipos de mensagens:

suporta mensagens com ou sem confirmação, permitindo uma orientação à confiabilidade, no caso de mensagens com confirmação, ou orientação ao desempenho, no caso de mensagens sem confirmação.

Arquitetura mestre-escravo:

permite o relacionamento síncrono através de operação por varredura e relacionamento assíncrono através de respostas não solicitadas, de iniciativa das estações escravas.

Modos de endereçamento:

suporta três modos de endereçamento, sendo:

- a) independentes para mestre-escravos, permitindo a operação seletiva de vários mestres e escravos.
- b) de grupo, permitindo a seleção de lista de pontos.
- c) *broadcasting*, permitindo a difusão dos dados.

Protocolos CSMA:	define a utilização do protocolo CSMA (<i>Carrier Sense Multiple Access</i>), para disciplinar o acesso ao meio físico, permitindo o seu compartilhamento.
Tempo de propagação das mensagens:	define o procedimento para o cálculo do tempo de propagação das mensagens, permitindo desta maneira a sincronização dos relógios dos vários equipamentos do sistema.
Algoritmo CRC:	define a utilização de um algoritmo para CRC (<i>Cyclic Redundancy Code</i>), que proporciona uma alta segurança nos dados, equivalente à distância de <i>hamming 6</i> , o que garante que a ocorrência de cinco erros em nível de "bit" em cada bloco de 128 bits é seguramente detectada. Com isto, atende ao nível de integridade "I3", com taxa de bit de erros menor ou igual a $10E-4$, definida da IEC - 870-5. O tempo médio entre os erros não detectados numa condição de um <i>frame</i> com 100 bits, com taxa de transmissão de 1200 bits/seg e com uma taxa de erro de $10E-4$ levada a efeito por ruído, é igual a 260 000 anos.
Congelamento:	tem a capacidade de congelar dados em um determinado instante por um intervalo de tempo, permitindo que se obtenha dados de um escravo referenciado a um determinado instante.
Níveis de prioridade:	suporta o estabelecimento de priorização das mensagens, permitindo o estabelecimento da hierarquia de mensagens.
Registro de tempos:	suporta a associação de tempo aos dados transmitidos, permitindo o trânsito de mensagens com dados de SOE (<i>Sequency Operation Event</i>).

Objetos de dados:

define vários objetos de dados orientados para a necessidade do setor de energia, tais como: entrada binária; saída binária; contador; entrada analógica; saída analógica; tempo.

Como estes objetos são definidos quanto à sua formatação e interpretação, é possível a portabilidade de dados entre os vários equipamentos, sem a necessidade de tradutores.

Arquitetura EPA:

adota o modelo de arquitetura EPA (*Enhanced Performance Architecture*), definido pela ISO, o que possibilita um alto desempenho e sua aplicação em equipamentos de pequeno porte. Uma implementação mínima do DNP utiliza aproximadamente 5 kB de memória e pouca capacidade de processamento.

Capacidade de endereçamento:

tem a capacidade de endereçar até 65.536 mestres e 65.536 escravos, permitindo uma grande diversidade de equipamentos. Também tem a capacidade de endereçar diretamente 4.294.967.296 pontos (equivalente a capacidade de endereçamento de 32 bits)[3].

Independência do meio de comunicação:

tem a capacidade de operar sobre todos os meios de comunicação típicos dos sistemas de supervisão e controle, tais como: rádio; fibra óptica; par metálico; cabo coaxial e outros.. Além disso, a camada de aplicação pode ser utilizada com outras camadas de enlace ou física, como redes de pacotes e sistema *trunk* de rádio, permitindo uma grande flexibilidade na sua utilização.

Frame FT3:

adota o formato de *frame FT3* definido na IEC 870-5, que lhe proporciona uma alta taxa de transferência de dados, com uma eficiência de 78 %. A eficiência é a razão entre a parcela do *frame* que contém

informação e o tamanho total do “*frame*”.

O protocolo de comunicação DNP 3.0 possui a função de transporte em conformidade com a ISO/OSI.

Como exemplo, na linha de Arquitetura Distribuída, a empresa americana *Chattanooga Power Board*, em 1995, realizou um *up-grade* em seu sistema SCADA, adquirindo o sistema *OASyS 6.0*. Esse sistema, segundo descrição do fabricante, possui uma Arquitetura Aberta, tendo em conta uma interface gráfica avançada e um sistema de *software* e protocolos desenvolvidos utilizando-se da técnica de Programação Orientada ao Objeto.

O *OASyS 6.0* é baseado na tecnologia Cliente-servidor e se utiliza de várias LAN's com topologia Ethernet e protocolos TCP/IP, rodando o sistema servidor Hewlett Packard 9000 Risc, UNIX, suportando o conceito de sistema aberto.

2.3. CONCLUSÕES

Os sistemas de automação de subestações de Energia Elétrica modernos são implementados com Arquiteturas de Sistemas Abertos, baseados em processamento distribuído, possibilitando um crescimento modular e atualização a baixos custos.

A interface gráfica, os protocolos de comunicação e o gerenciamento da base de dados devem idealmente seguir padrões de domínio público. Como os gerenciadores das bases de dados não foram desenvolvidos para operarem em tempo real, deve-se utilizar máquinas de elevado desempenho.

O gerenciamento eficiente da rede de nós independentes de um sistema aberto é de vital importância para a interoperabilidade, logo, as entidades internacionais tem procurado recomendar os protocolos de comunicação a serem utilizados em cada um dos níveis de comunicação.

Capítulo 3: SISTEMA ESPECIALISTA PARA A INTEGRAÇÃO DE OPERAÇÃO, SUPERVISÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1. A INTEGRAÇÃO DA OPERAÇÃO, SUPERVISÃO E DIAGNÓSTICOS DE FALHAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Normalmente os sistemas de operação e supervisão de sistemas de energia elétrica disponíveis no mercado são voltados para a supervisão e controle, não se atendo para o diagnóstico de falhas, ou ainda, a interação com o usuário com vistas a “ensiná-lo” a operar o sistema.

Pelo exposto, são inconteste os ganhos que teríamos com um sistema que além de fazer o controle do processo, pudesse dar o apoio necessário para as tomadas de decisões do operador.

Não são raros os erros de manobras ou de decisões equivocadas levadas a efeito durante a operação de sistemas de energia elétrica, expondo a empresa a gastos evitáveis e, ou, o que é mais importante, algumas vezes expondo vidas humanas.

O trabalho foi desenvolvido de forma a que toda a lógica de intertravamento se dê a nível de *software*, a partir da supervisão do estado dos equipamentos e relês constantes no banco de dados, em tempo real, de forma que a exteriorização do comando somente se efetive com as condicionantes atendidas. No caso de incompatibilidade, o sistema deverá inibir o comando e informar ao operador o motivo de sua não execução e o orientará quanto aos procedimentos mais adequados para a correta operação do sistema.

Em um estágio mais avançado, na ocorrência de contingências, haverá a mudança de estado de itens selecionados, o qual deflagrará o desencadeamento de um sistema de inferências baseado em regras de produção. Esse procedimento visa dar um diagnóstico preciso no menor espaço de tempo possível, com vistas a subsidiar o operador nas suas tomadas de decisões, dando-lhe inclusive as orientações básicas para os procedimentos mais adequados para o momento.

O sistema, numa versão mais completa, integrará diversas telas gráficas, ordenadas de forma didática e funcional, com módulos gráficos dispostos ergonomicamente na tela, de forma a termos uma Interface Homem-máquina funcional.

O diagrama funcional do sistema deverá ser claro, objetivo e preciso, indicando o estado dos equipamentos e as principais grandezas a serem monitoradas, tais como corrente e tensão nas barras de operação.

O sistema será implementado utilizando-se a *Shell* para desenvolvimento de Sistemas Especialistas - Kappa - PC, sobretudo pela possibilidade de trabalharmos com *frames* e Regras de Produção de forma concomitante, bem como de podermos utilizar as regras como parte integrante da programação orientada ao objeto.

3.2. A UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS COMO APOIO A DECISÃO

3.2.1 GENERALIDADES

Desde há muito tempo que se procura implementar em Sistemas Computacionais, métodos que emulem o raciocínio humano, na pretensão de torná-los inteligentes o suficiente, capacitando-os a tomarem decisões em situações de ineditismos.

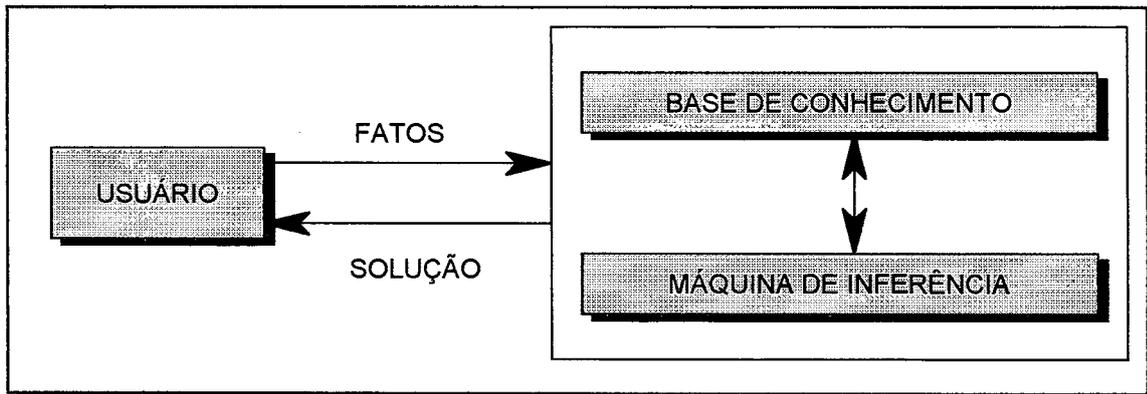
Fischler e Firschein [8] sugerem três requisitos para que um Sistema Computacional seja considerado inteligente, quais sejam:

- i) O sistema deve ser capaz de resolver uma ampla gama de problemas, incluindo formulações para as quais não foi projetado.
- ii) O sistema deve ser capaz de explicitar informações implícitas, ou seja, de uma informação qualquer ele deve ser capaz de derivar todas as suas representações equivalentes.
- iii) O sistema deve ter uma estrutura de controle que determine que transformações aplicar, quando obteve uma informação ou quando um esforço adicional será inútil.

Dos três requisitos acima, o atendimento ao primeiro é extremamente complexo, assim, como definição de sistemas inteligentes, o Prof. *Edward Feigenbaum* da Universidade de *Stanford*, é mais complacente, quando afirma que um Sistema Especialista é um programa “inteligente” que utiliza procedimentos de inferências e base de conhecimento para a solução de problemas que requerem especialistas humanos para sua solução [4]. Um Sistema Especialista, ou inteligência artificial é um sistema computacional que emula a habilidade de tomar decisões de um especialista humano. O termo emular a habilidade de tomar decisões significa que o sistema especialista é concebido para atuar nas áreas em que os especialistas humanos o fazem, a partir de inferências de um banco de conhecimento adquirido de um especialista humano.

A figura abaixo ilustra o conceito básico de um Sistema Especialista baseado no conhecimento:

Figura 3.1 – Conceito básico de um Sistema Especialista baseado no conhecimento



O usuário alimenta a base de conhecimento com fatos e conhecimentos e recebe soluções para problemas específicos em áreas específicas.

Internamente, o Sistema Especialista consiste de uma base de conhecimento e de uma máquina de inferência. A base de conhecimento contém o conhecimento com o qual a máquina de inferência chega as conclusões que são as respostas requeridas pelos usuários.

No domínio do conhecimento, o qual é inscrito ao domínio do problema em análise, o Sistema Especialista raciocina e faz inferências da mesma maneira que um especialista humano poderia inferir para encontrar a solução do problema, ou seja, na presença de algumas ocorrências, são inferidas conclusões.

Os Sistemas Especialistas possuem diversas vantagens, das quais podemos citar algumas:

Disponibilidade do conhecimento:

um Sistema Especialista, uma vez implementado, estará sempre disponível para a empresa, pois o conhecimento ficará armazenado na base de conhecimento do sistema.

Custo reduzido:

Os recursos humanos podem ser otimizados com o uso de Sistemas Especialistas, uma vez que a máquina poderá absorver parte do tempo a ser gasto por especialistas na busca de determinadas soluções.

Permanência:	o conhecimento sintetizado na base de conhecimento é permanente, enquanto que os especialistas humanos são mais transitórios em relação a empresa.
Rapidez na reabilitação:	ao contrário dos especialistas humanos, os Sistemas Especialistas não se cansam ou se estressam, portanto, não são susceptíveis aos erros ocasionados pelos estresses ou cansaço.
Explicação:	os Sistemas Especialistas podem mostrar em detalhes as razões que o levaram a uma dada conclusão.
Respostas rápidas:	respostas rápidas ou em tempo real podem ser necessárias para algumas aplicações. Dependendo do <i>software</i> e <i>hardware</i> utilizado, um Sistema Especialista pode responder mais rápido e estar mais disponível do que um especialista humano. Algumas situações de emergência podem requerer respostas mais rápidas do que seria possível com um especialista humano. Nesta condição, um Sistema Especialista em tempo-real seria uma boa escolha.
Base de dados inteligente:	um Sistema Especialista pode ser usado para acessar uma base de dados de maneira inteligente.

Uma grande vantagem dos Sistemas Especialistas é o fato de que a base de conhecimento pode ser atualizada de forma dinâmica e permanente, permitindo ao sistema a aquisição acumulativa dos fatos possíveis, geradores de respostas também possíveis, tornando-as cada vez mais consistente.

Uma das desvantagens do Sistema Especialista é quanto a resposta à um problema, em situações ainda desconhecidas para a sua base de conhecimento. Porém, em uma análise mais sucinta, como reagiria o ser humano em uma situação semelhante? Normalmente tendemos a acreditar que o ser humano em situações de ineditismo, tende a seguir sua “intuição”. Porém, admitindo-se que essa “intuição” seja na realidade o fruto de inferências a partir de dados coletados por experiências já vivenciadas, atualmente residentes no inconsciente do indivíduo, poderíamos imaginar um computador com um banco de conhecimento de altíssima capacidade e uma máquina de inferência estruturada para manipulá-la, assim, não seria difícil imaginar um aplicativo desenvolvido nessa

máquina que explorasse esse potencial para a solução de problemas específicos, como um Sistema Especialista dotado de alguma intuição.

O método mais comum de representação do conhecimento em Sistemas Especialistas é da forma ... *if...then*, na forma de regras, da seguinte maneira: se o estado do RLI é aberto então desligue o DJI, ou seja, se o estado de RLI é aberto, então é realizada a ação de abrir o DJI.

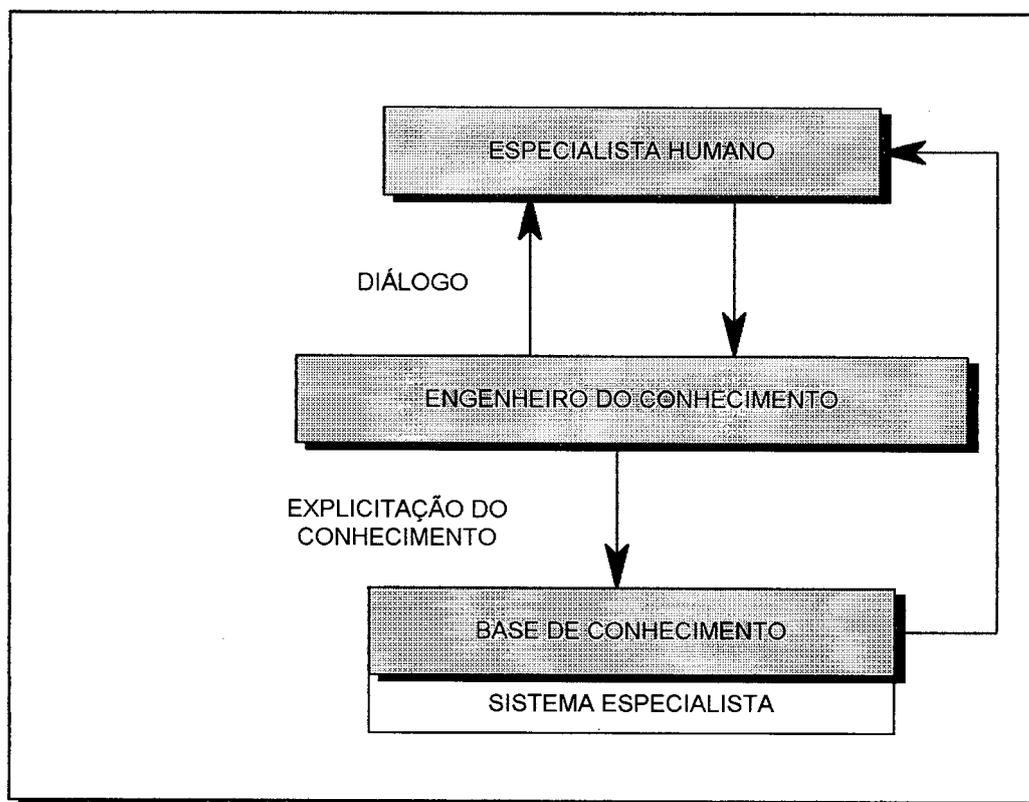
Os primeiros Sistemas Especialistas foram desenvolvidos entre 1950 e 1960 [4].

Uma das grandes versatilidades desses sistemas é que os conhecimentos podem ser encapsulados em regras e objetos.

O processo de construção de sistemas especialistas é chamado de Engenharia do Conhecimento e é realizado pelo Engenheiro do Conhecimento (Michie 73) [4].

O processo recomendado para a construção de Sistemas Especialistas segue o esquema da figura a seguir:

Figura 3.2 – Processo para construção de um Sistema Especialista



Inicialmente o engenheiro do conhecimento estabelece um diálogo com um especialista humano, com vistas a alimentar a base de conhecimento do sistema, analogamente ao desenvolvimento de um sistema convencional, onde o engenheiro de sistema discute com o cliente sobre os requisitos do sistema que deverá ser estruturado. O engenheiro do conhecimento então codifica o conhecimento na base do conhecimento do sistema. O engenheiro especialista avalia os resultados das inferências e faz a crítica do sistema.

Alguns Sistemas Especialistas permitem ao sistema aprender regras a partir de exemplos, através de *indução de regras* [4], nas quais o sistema cria regras a partir de tabelas de dados.

Um Sistema Especialista ao ser projetado deve sempre que possível possuir as seguintes características gerais:

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta performance: | o Sistema Especialista deve ser capaz de responder com igual ou melhor eficiência que um especialista humano na área. |
| Resposta adequada no tempo: | o Sistema Especialista deve ter um tempo de <i>raciocínio</i> comparável ou melhor do que o de um especialista humano na área. |
| Inteligível: | o Sistema Especialista deve ser capaz de mostrar os passos que o possibilitou chegar ao resultado exteriorizado, ou seja, ele deve ter a capacidade de mostrar as justificativas que o levou a solução da mesma forma que um especialista humano o faria. |
| Flexibilidade: | devido a grande quantidade de conhecimento que um Sistema Especialista pode ter, é importante que se busque um mecanismo eficiente para que se consiga adicionar, substituir e deletar conhecimentos. Uma das razões da popularidade dos sistemas baseados em regras de produção é o armazenamento modular e eficiente das regras. |

Adicionalmente, é importante, dependendo do sistema especialista em desenvolvimento, a implementação de **meta-regras**, que são procedimentos que demonstram o conhecimento sobre as regras que levaram às hipóteses. Para tanto, o sistema poderia prover as seguintes facilidades:

Listagem do raciocínio que levou a hipótese selecionada:

as hipóteses são os objetivos atingidos pelo processo de inferência. Por exemplo, em um dado Sistema Especialista que faça a análise de um processo de intertravamento de equipamentos de manobra em uma subestação de energia, ao se dar comando em uma chave seccionadora, o sistema inibe o comando devido a existência de restrições, porém, muitas seriam as causas que poderiam levar à hipótese de inibição do comando, portanto, essa hipótese de inibição do comando deve suscitar dúvidas quanto a sua veracidade, logo, é interessante que o sistema informe o raciocínio que o levou a conclusão da impossibilidade de exteriorização do comando de abertura da chave, informando por exemplo que o comando foi inibido devido ao fato de que o disjuntor associado a chave seccionadora comandada está no estado fechado, sendo esse um fator restritivo para sua operação.

Listagem de todas as hipóteses que possam explicar as evidências observadas:

por exemplo, ao ser dado comando em um disjuntor através de um Sistema Especialista, esse comando foi inibido por ter sido observado mais de uma evidência restritiva, tais como, baixa pressão de óleo hidráulico, baixa pressão de SF₆, operação de relê de bloqueio. Como todas essas evidências são restritivas ao comando, o sistema deverá listá-las todas, dando a devida credibilidade ao sistema.

Explicar todas as conseqüências de uma hipótese:

se uma lista de regras de produção é disparada devido a mudança de estado de um dado componente elétrico do circuito, tal como a atuação do relê de gás de um auto-transformador na presença de restrição para a inserção do transformador reserva do banco, seria interessante que o sistema especialista exteriorizasse as conseqüências mais prováveis devido à operação do

sistema com o banco desenergizado. Obviamente, se esse sintoma não é observado, a credibilidade do sistema poderá ficar comprometida.

Na realidade as meta-regras se constituem em recursos que visam provar o objetivo levado a efeito pelas regras acionadas. Para o caso em análise, o usuário poderia formular ao sistema como poderia ter certeza da veracidade das restrições, tais como atuação do relê de gás e impossibilidade de colocação em serviço do auto-transformador reserva, e o sistema poderia responder recomendando a análise espectrográfica do óleo isolante da unidade defeituosa combinando com a orientação da observância do livro de manutenção da usina ou subestação.

É importante associarmos o desenvolvimento dos Sistemas Especialistas à *ciência cognitiva*.

A cognição é o esforço na compreensão de como os humanos processam as informações. Em outras palavras, cognição é o estudo de como as pessoas pensam, especialmente quando estão empenhadas na solução de problemas [4].

É muito importante o entendimento da cognição humana, se pretendermos implementar sistemas que emulem especialistas humanos, pois este é o princípio básico necessário e suficiente para podermos codificar programas que venham a fazer as vezes de especialistas. Porém, é importante entendermos que muitas soluções levadas a efeito por especialistas são praticamente impossíveis de serem explicadas por eles próprios, pois são produtos de um *filling*, ou de um conhecimento subjetivo que nem sempre somos capazes de explicar a partir de uma lógica natural.

Entre 1950 e 1960, muitos programas foram escritos com a finalidade de se buscar a solução de problemas gerais. Um dos mais conhecidos trabalhos nesse campo foi a *Solução de Problemas Gerais*, criado por Newell e Simon, descritos em uma série de artigos, culminando em seu livro "Resolvendo Problemas Humanos" (Newell 72)[4].

O resultado mais significativo do trabalho de Newell e Simon foi a demonstração de que muitas das soluções dos problemas humanos, frutos da cognição, poderiam ser expressadas por regras de produção na forma **if**"...**then**...", por exemplo: **se** o tempo está para chuva, **then** leve o seu guarda-chuva. Podemos assumir uma regra como um conjunto modular de conhecimento, as quais são organizadas em arranjos *soltos*, conectadas com outros grupos de conhecimento. Há um certo entendimento de que a memória humana está organizada com os conhecimentos situados de forma *soltas* e relacionadas com outros grupos de conhecimentos, segundo uma afinidade pontual ou permanente. A seguir, um exemplo:

Se o operador está cansado e o serviço é repetitivo **então** a possibilidade de erros de operação é grande.

O uso de regras para representar o conhecimento humano foi popularizado por Newell e Simon, como também mostraram como se pode modelar o raciocínio humano com regras. A idéia básica é que um sensor de entrada estimula o cérebro. O estímulo dá partida na regra apropriada na memória de “*long-term*” [4] a qual produz uma resposta apropriada. A memória de *long-term* é onde nosso conhecimento é armazenado. Como exemplo, todos temos regras tais como:

Se há chama **então** há fogo

Se há fumo **então** poderá haver fogo

Se há sirene **então** poderá haver fogo

Podemos notar que as duas últimas regras não estão completamente fechadas em si mesmas. Pode haver fumo ou sirene e não necessariamente haver fogo. O estímulo devido a existência de fogo dará partida nas regras que possuam similaridades.

A memória de longo termo consiste de muitas regras com a simples estrutura *if...then...* Analogamente, a memória de *curto-termo* é usada para o armazenamento temporário, durante a solução de problemas. Embora a memória de *curto-termo* possa armazenar muitos conhecimentos, ela é surpreendentemente pequena. Como exemplo, podemos imaginar que possuímos em nossa memória (memória de longo termo) muitos números (telefones por exemplo), mas se tentarmos visualizar mentalmente, somente seremos capaz de visualizar uns 4 a 7 números de cada vez. Essa é a memória de *curto-termo*.

Uma das teorias propostas é a de que a memória de *curto-termo* representa o número de regras que podem ser ativadas simultaneamente, e considera a solução de problemas na esfera humana como a consequência da ativação dessas regras na memória.

O processamento cognitivo é o outro elemento necessário para a solução de problemas humanos.

O processamento cognitivo tenta encontrar as regras que serão ativadas pelo estímulo apropriado. O processamento cognitivo consiste na priorização das regras, a partir da máquina de inferência. Se são ativadas várias regras, o processamento cognitivo deve resolver o conflito e decidir qual a regra que terá prioridade. A regra com maior prioridade será executada. A máquina de inferência corresponde ao processador cognitivo.

Para Newell e Simon, o modelo de solução de problemas humanos envolvendo a memória de *longo-termo* e a memória de *curto-termo* e o processador cognitivo é a base dos modernos Sistemas Especialistas baseados em regras de produção [4].

As regras individuais que integram um sistema de produção são chamadas de regras de produção. Em Sistemas Especialistas, um fator importante é a soma dos conhecimentos inseridos em uma regra. Se a quantidade de conhecimentos na regra é muito pequena, ela fica difícil de ser reconhecida sem a referência de uma outra, por outro lado, se a quantidade de conhecimento na

regra é muito extensa, o Sistema Especialista fica muito difícil de ser modificado, isto porque haverá uma porção de conhecimento muito grande entremeada em apenas uma regra.

Os Sistemas Especialistas baseados em regras de produção são eficientes para serem utilizados como meios para a solução de problemas específicos. Para a solução de problemas gerais, os Sistemas Especialistas tornar-se-ão eternos aprendizes, pois a cada caso novo, deverá ser buscado novos conhecimentos para a sua solução. Como exemplo, observamos que o melhor jogador de xadrez é o jogador humano, a despeito de que os computadores são muito mais velozes do que os humanos no processamento de cálculos [4].

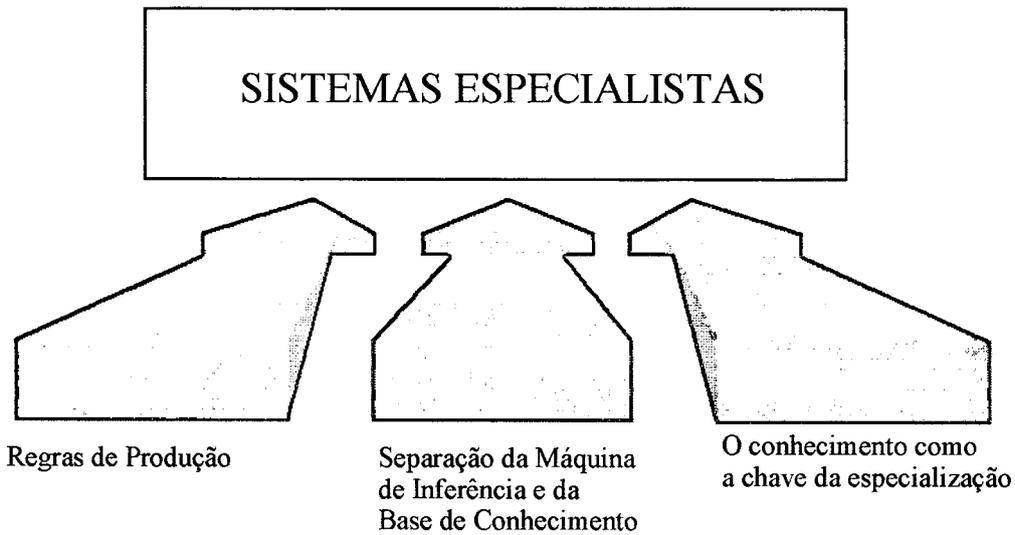
Com a aceitação do paradigma baseado em conhecimento, em 1970, foram criados com sucesso vários protótipos de Sistemas Especialistas. Esses sistemas poderiam interpretar espectogramas de massa para identificar constituintes químicos (DENDRAL), análise de dados geológicos para detecção de óleo (DIPMETER) e minerais (PROSPECTOR), e sistema de configuração de computadores (XCON/R1) [4].

O sistema especialista MYCIN foi muito importante por muitas razões. Primeiro, ele demonstrou que a Inteligência Artificial poderia ser usado para a solução de problemas práticos do mundo real. Segundo, MYCIN testou novos conceitos tais como, facilidade de explanação, aquisição automática de conhecimento e tutorial inteligente. A terceira razão que fez de MYCIN uma experiência importante, foi a demonstração da exequibilidade da construção de *shell* para o desenvolvimento de Sistemas Especialistas.

Sistemas Especialistas construídos anteriormente ao MYCIN, tais como o DENDRAL, eram sistemas que possuíam a base de conhecimento entremeada com a parte do software que se utiliza do conhecimento, ou seja, a máquina de inferência. O MYCIN separou a base de conhecimento da máquina de inferência, passo esse muito importante para a tecnologia de desenvolvimento de Sistemas Especialistas, isto porque o núcleo essencial dos sistemas poderiam ser reutilizados, o que significa que um novo Sistema Especialista poderia ser construído muito mais rapidamente do que um sistema do tipo DENDRAL, apenas substituindo-se a base de conhecimento, ou seja, a estrutura do MYCIN que se ocupa com a máquina de inferência e as explanações, poderiam então serem recarregados com o conhecimento do novo sistema. A parte comum do sistema foi chamada de EMYCIN, (*Essential/Empty MYCIN*).

Mais tarde, a maioria dos Sistemas Especialistas foram concebidos a partir da convergência de três conceitos básicos, que são *as regras, a shell, e o conhecimento*, ilustradas na figura abaixo:

Figura 3.3 – Conceitos básicos para concepção de Sistemas Especialistas



A partir de 1980 os Sistemas Especialistas entraram nas indústrias e começaram a ser produzidos produtos. Foram introduzidos novos *softwares* para o desenvolvimento de Sistemas Especialistas, tal como o *Automated Reasoning Tool* (ART) pela empresa *Inference Corporation*. O *Knowledge Engineering Tool* (KEE) pela empresa IntelliCorp etc. Adicionalmente, foram desenvolvidos novos hardware especializados que possibilitaram rodar *softwares* com grande velocidades.

3.2.2 A INTERPRETAÇÃO COGNITIVA DA APRENDIZAGEM E OS SISTEMAS ESPECIALISTAS

Em um sistema computacional convencional, a solução de problemas é buscada quase sempre a partir de resoluções algoritmos com base em cálculos numéricos, tendo o especialista a tarefa de fazer a avaliação e análise dos resultados encontrados, a partir do raciocínio comparativo, normalmente simbólico, enquanto que em Sistemas Especialistas as soluções são buscadas já a partir do raciocínio simbólico. Essa é a diferença básica entre os Sistemas Especialistas e um sistema computacional convencional.

Os seres vivos tendem a raciocinar de forma simbólica. Gestalt, grande estudioso do *insight*, foi um dos grandes colaboradores para o entendimento do processo de cognição. A compreensão das relações lógicas ou das percepções das conexões entre meios e fins a partir do conhecimento do mundo levam a reorganização perceptiva de Gestalt, aprendizagem essa que ainda segundo Gestalt leva a convicção da compreensão de fato, cognição essa que possui especial resistência ao esquecimento e grande possibilidade de ser transferida ao raciocínio em situações novas. Isso nos mostra de forma clara, como temos dificuldade de esquecer o aprendizado levado a efeito a partir das experiências vivenciadas no mundo prático, fruto da exploração exaustiva do mundo associado ao fato, a partir da nítida compreensão do processo.

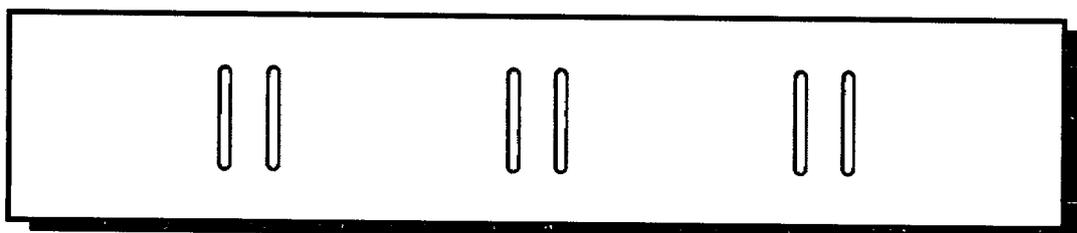
Em uma tentativa de compararmos um sistema computacional convencional e um Sistema Especialista, na solução de problemas em uma área específica, citemos a experiência de Köhler, o qual realizou extensas pesquisas com macacos, sobre soluções inteligentes de problemas. Estes estudos estão descritos em seu livro *The Mentality of Apes (Köler, 1925)*. Köhler colocou bananas fora do alcance de macacos, os quais teriam que usar recursos para apanhá-las que não faziam parte de sua experiência habitual. Por exemplo, foram penduradas bananas no alto da jaula e colocadas caixas em um canto, de forma que se colocadas sob a banana o macaco poderia subir nelas e apanhá-las, ou ainda, a banana poderia estar fora da jaula de formas que o macaco poderia alcançá-la com o uso de uma vara disponível. Segundo Gestalt, esses arranjos tinham a vantagem de tornar visíveis ao animal todos os elementos necessários a solução. Como resultado desses testes verificou-se que os macacos inicialmente tentavam alcançar a fruta pelos meios conhecidos. Esgotados esses meios, os animais começavam a explorar os meios inéditos, até que subitamente encontravam a solução. As tentativas de solução pelos métodos já conhecidos pelos macacos, refletem bem os métodos computacionais procedurais, bastantes eficientes para o apoio a decisão em situações convencionais, enquanto que as experimentações nas situações de ineditismo, com o macaco explorando o raciocínio simbólico refletido pela percepção que possuem de seu mundo, levando-o muitas vezes a solução satisfatória de seu problema, lembra bem os Sistemas Especialistas, os quais possuem em seus *frames* e na sua máquina de inferência os conhecimentos do mundo para o qual foram projetados, possibilitando inclusive, a inclusão de novos conhecimentos, aumentando assim as possibilidades de *insight* do sistema.

É condição obrigatória do *insight* que os aspectos não sejam vistos de forma isolada, e sim, em relação aos outros, os quais devem aparecer como uma gestalt única, ou seja, os *flashes* de memórias não são elementos isolados, e sim, partículas integrantes de um mundo restrito e organizado.

Assim, nos Sistemas Especialistas, o *insight* para a busca das soluções de um determinado problema consiste na correlação estabelecida pelas regras de produção a serem acionadas, as quais encerram em sua construção parte importante do conhecimento do mundo no domínio dos problemas a serem resolvidos. Koffka (1935), no livro *Principles of Gestalt Psychology*, assinalou que se podiam usar os mesmos princípios para se avaliar os fatores que determinam a ocorrência de um *insight*, tanto em situações de solução de problemas complexos como em situações perceptivas muito simples. Para isso, sugeriu que algumas leis da percepção proposta por Wertheimer podiam também ser tomadas como leis da aprendizagem.

A lei da proximidade, de Wertheimer, quando aplicada à percepção, refere-se à maneira pela qual elementos, de acordo como estão dispostos no espaço, tendem a formar grupos, de tal modo que os itens mais próximos se agrupem num conjunto perceptivo. Por exemplo, se uma série de linhas paralelas estão traçadas numa folha de papel, com espaços alternadamente largos e estreitos entre as linhas, os pares com espaços estreitos entre si, serão vistos como grupos de duas, conforme a seguir:

Figura 3.4 – Lei da Proximidade de Wertheimer



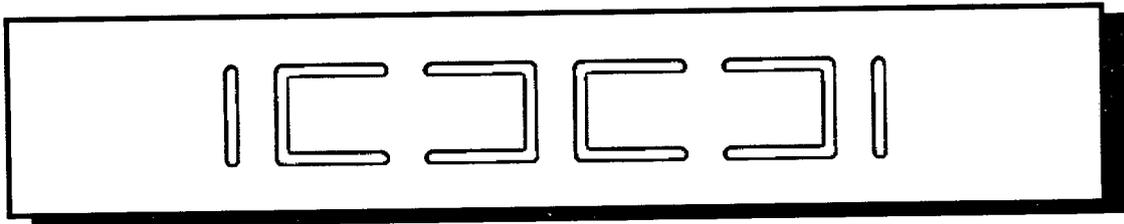
Sob o aspecto perceptivo, veremos em conjunto as linhas com espaço estreito entre si e não os pares com espaço maior, isto porque a proximidade é maior para as linhas com espaço estreito entre si.

Com relação a aprendizagem, a lei da proximidade pode referir-se ao espaço e ao tempo.

Com relação ao espaço, ele explica como o macaco percebe com mais facilidade a possibilidade de alcançar a banana se esta estiver do mesmo lado da jaula em que se encontre a vara. Este exemplo mostra com nitidez a vinculação de percepção e aprendizagem. Com relação ao tempo, explica por que é mais fácil lembrar acontecimentos recentes, que estão mais próximos do presente, e, portanto mais vinculados aos interesses do presente numa gestalt comum.

A lei do fechamento, de Wertheimer, afirma que áreas fechadas formam, mais facilmente, unidades. Com esta lei aplicada a percepção, pode-se verificar tal fato referindo-se ao exemplo anterior das linhas paralelas. É possível modificar o agrupamento e fazer com que os pares de linhas separadas mais amplamente apareçam como grupos. Esta modificação pode ser efetuada unindo-se as extremidades destas linhas de modo que formem dois lados de uma caixa. As linhas de ligações não necessitam ser completas; na medida em que os pares de linhas mais amplamente separadas aparecem como parte de uma figura que encerra espaço, as linhas tendem a ser vistas em conjunto, conforme a seguir:

Figura 3.5 – Lei do Fechamento de Wertheimer



A lei do fechamento de Wertheimer desempenha, na teoria cognitiva da aprendizagem, o mesmo papel que o reforço desempenha na teoria conexionista. Enquanto o indivíduo está envolvido por um problema, sua percepção da situação é incompleta, é necessário para completá-la o estabelecimento de uma meta ou objetivo, juntamente com um planejamento com vistas a integração das partes da situação até então separadas, tornando-a sob o aspecto da percepção uma figura perceptiva fechada, constituída pelo problema, a meta e os meios de alcançar a meta.

Em Sistemas Especialistas, podemos afirmar que a aprendizagem consiste na inserção de regras de produção e implementações de monitores, funções etc., de formas que se insira possibilidades de novas inferências com vistas a otimização de uma solução particular, ou ainda, da possibilidade de uma solução para um caso particular do problema. Ainda como extensão às teorias de Wertheimer, a percepção consiste na possibilidade da aproximação e/ou fechamento dos valores do sistema que refletem o conhecimento do domínio do problema, de formas que se possa, para uma dada condição, se vislumbrar uma aceitável solução para o problema. Do ponto de vista de implementação, os ganhos referentes a aplicação da lei da proximidade e do fechamento de Wertheimer, poderia ser levada a efeito a partir da utilização de algumas técnicas, tais como programação orientada ao objeto, agendas em regras de produção etc.

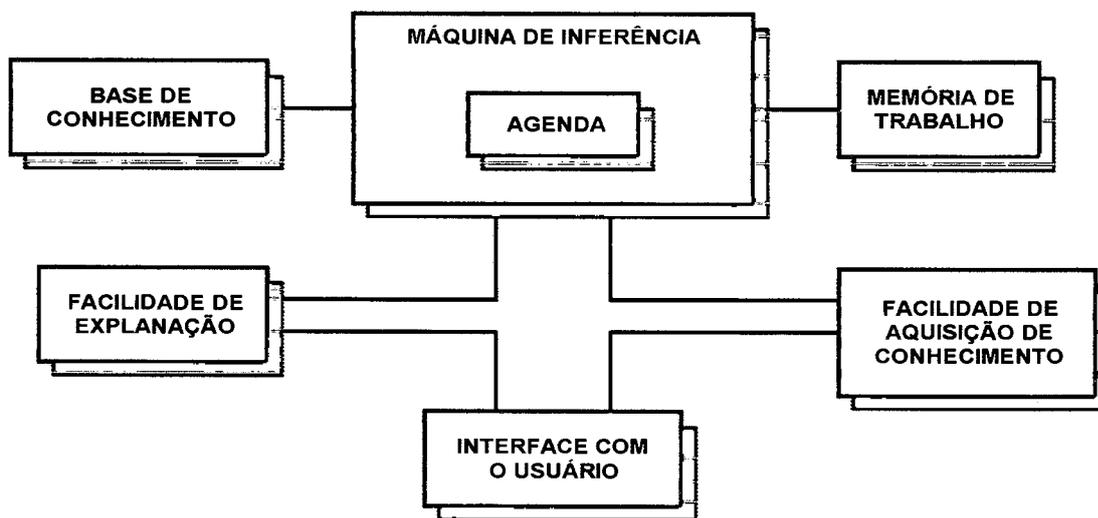
3.2.3 CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA ESPECIALISTA

Um Sistema Especialista deve sobretudo concentrar seus esforços na robustez e flexibilidade dos meios de representação do conhecimento. O paradigma de Sistemas Especialistas deve permitir níveis de abstrações de dados e de conhecimento, bem como devem separar os dados dos métodos que os manipulam.

Em um Sistema Especialista podemos associar os fatos às abstrações dos dados e as regras e funções às abstrações do conhecimento. A separação do conhecimento e dos dados permite um maior grau de paralelismo e modularidade [4].

Na figura a seguir podemos ver os elementos básicos formadores de um Sistema Especialista baseado em regras de produção.

Figura 3.6 – Elementos básicos formadores de um Sistema Especialista



Damos abaixo os principais componentes de um Sistema Especialista:

- Interface com o usuário:** é o mecanismo de interação entre o usuário e o Sistema Especialista.
- facilidade de explanação:** é a explanação da base de raciocínio do sistema para o usuário.
- Memória de trabalho:** é uma base de dados global de fatos usado pelas regras.
- Máquina de inferência:** faz a inferência decidindo quais as regras que são satisfeitas pelos fatos ou objetos, priorizando as regras satisfeitas e executando as regras de maior prioridade.
- Agenda:** é uma lista priorizada de regras criada pela máquina de inferência, cujos padrões são

satisfeitos pelos fatos ou objetos na memória de trabalho.

Facilidade de aquisição de conhecimento: é um modo automático para o usuário inserir conhecimento no sistema.

Em alguns Sistemas Especialistas, são implementadas facilidades de criação automática de regras, a partir de exemplos, assim, o sistema adquire conhecimento pela indução de regras.

A base de conhecimento é também chamada de memória de produção em um Sistema Especialista baseado em regras de produção.

Em sistemas baseados em regras de produção, a máquina de inferência determina quais as regras antecedentes, se houver alguma, deverão ser satisfeitas pelos fatos. São comumente usados dois métodos de inferência, *busca para frente* e *busca para trás*, como estratégias para a solução de problemas para Sistemas Especialistas. Existem outros métodos menos utilizados, tais como *análises de meios e fins*, *redução de problemas*, *backtracking*, *plan-generate-test* etc.

A busca para a frente, é um raciocínio que parte das causas para os efeitos ou conclusão, enquanto que a busca para trás é um raciocínio que parte do efeito para as causas.

Exemplo de busca para a frente: se o disjuntor DJ-3030 está fechado (fato) então o comando de abrir a seccionadora CS-3010 deve ser inibido (efeito).

Exemplo de busca para trás: se o comando de abrir a seccionadora CS-3010 foi inibido (efeito) então o disjuntor DJ-3030 deve estar fechado (fato). O efeito pode ser interpretado como um objetivo para ser provado.

Uma máquina de inferência pode fazer tanto a busca para a frente como a busca para trás. Os aplicativos OPS5 e CLIPS são projetados para fazerem a busca para a frente enquanto o EMYCIN faz a busca para trás. Já as máquinas de inferência dos aplicativos ART, KEE e Kappa-PC fazem tanto a busca para a frente como a busca para trás. A escolha do tipo de inferência depende do problema. Problemas de diagnósticos são melhores solucionados usando-se a busca para trás enquanto que problemas de prognósticos, monitorações e controles possuem uma melhor performance quando se utiliza a busca para frente.

A memória de trabalho pode conter fatos considerando o *status* corrente de um dado disjuntor, tais como o “*o disjuntor dj1 está fechado*” ou “*o disjuntor dj1 está aberto*”. Ambos os fatos podem estar simultaneamente na memória de trabalho. Se o disjuntor está trabalhando normalmente, então somente um desses fatos poderá ser verdadeiro, logo, somente um desses fatos poderá estar na memória. Porém, se houver um defeito no sistema, haverá a possibilidade de termos os dois fatos na memória. Esta é a grande diferença entre a base de conhecimento e a memória de trabalho. Os fatos não interagem uns com os outros. O fato, *o disjuntor dj1 está*

fechado não interage com o fato *o disjuntor dj1 está aberto*, embora o sujeito seja comum. Porém, a base de conhecimento, a respeito do sujeito, nos sugere que a presença dos dois *status* antagônicos entre si, indica a presença de defeito no disjuntor, ou alguma incorreção na aquisição e/ou tratamento dos dados.

Se há um fato *o disjuntor dj1 está fechado* na memória de trabalho, a máquina de inferência notará que este fato satisfaz a parte condicional da *regra fechamento disjuntor dj1* e colocará essa regra na agenda. Se uma regra está relacionada a vários modelos, então todos os modelos devem ser simultaneamente satisfeitos para que a regra seja colocada na agenda. Alguns modelos podem sempre ser satisfeitos a partir da especificação da ausência de certos fatos na memória de trabalho.

As regras cujos padrões são satisfeitos, são **ativadas**. Na agenda podem estar muitas regras ativadas ao mesmo tempo. Neste caso a máquina de inferência deverá selecionar uma regra de cada vez para disparar. Esse procedimento é inspirado na neurofisiologia, no fenômeno chamado de refração, onde uma célula nervosa, quando estimulada, emite uma descarga elétrica. Após a emissão dessa descarga elétrica, essa célula nervosa fica inibida por um curto período de tempo, de forma que se evite a emissão de um novo estímulo a partir de uma estimulação furtiva.

Os Sistemas Especialistas baseados em regras de produção se utilizam da refração para prevenir o disparo indesejável de regras de produção, ou seja, se a mesma regra fosse disparada muitas vezes pelo mesmo fato, o Sistema Especialista não conseguiria concluir uma tarefa usual.

Já foram desenvolvidos vários métodos para prover a refração. Na linguagem de Sistema Especialista conhecido como OPS5, é dado a cada fato um único identificador chamado *timetag*, quando ele é introduzido na memória de trabalho. Após a regra ser disparada por um fato, a máquina de inferência não disparará nenhuma regra a partir daquele mesmo fato novamente, porque seu identificador já foi utilizado.

A lista de ações a serem executadas por uma regra, quando ela é disparada, segue o termo ***then***. Esta parte da regra é conhecida como ***resultado*** ou ***RHS (right-hand side)***. Quando a regra *fechamento disjuntor dj1* é disparada, a ação *bloquear a abertura das chaves seccionadoras CS1 e CS2* é executada. Usualmente, ações específicas incluem a adição ou remoção de fatos na memória de trabalho, ou ainda a impressão de resultados na tela. O formato dessas ações depende da sintaxe do sistema em que se esteja trabalhando.

A máquina de inferência normalmente opera em ciclos, também conhecidos como ciclo de ação de reconhecimento, ciclo seletivo de execução, ciclo de resposta à situação etc. Independente do nome que se dê, a máquina de inferência repetirá a execução de um grupo de tarefas até o cumprimento de certos critérios para a sua finalização. Para o OPS5, uma *shell* típica para desenvolvimento de Sistemas Especialistas, um ciclo de uma tarefa compreende: resolução de conflito; ação; *match* e cheque para a finalização da atividade.

Resolução de conflito:	na ativação, deve ser selecionada a regra de maior prioridade.
Ação:	execução seqüencial da RHS da regra selecionada na ativação. Remove as ativações que deram partida à regra.
Match:	atualiza a agenda checando se a LHS de algumas regras estão satisfeitas. Se positivo, ativa elas. Remove a ativação se a LHS dessas regras não mais são satisfeitas.
Cheque para a finalização da atividade:	é realizado um procedimento de cheque para a finalização de uma atividade se uma ação de finalização é implementada ou um comando de parada é dado.

Durante um ciclo, muitas regras podem ser ativadas e colocadas em uma agenda. Também, ativações serão deixadas na agenda do ciclo anterior, a menos que elas tenham sido desativadas em função de que sua LHS não tenha sido satisfeita por muito tempo. Portanto, o número de ativações na agenda, variará com o procedimento de execução.

Dependendo do programa, uma ativação pode sempre estar na agenda mas nunca selecionada para partir uma regra. Outrossim, algumas regras podem nunca vir a ser ativada. Neste caso, essas regras devem ser reexaminadas, porque elas ou não são necessárias ou os seus padrões não foram corretamente projetados.

A máquina de inferência executa as ações de ativação de regras da agenda segundo o grau de priorização, até que não haja mais regras para serem ativadas. Normalmente, quando não se define essas prioridades, a própria máquina de inferência se encarrega de priorizá-las de forma aleatória.

Foram projetados vários esquemas de priorização para sistemas *shell* de desenvolvimento de Sistemas Especialistas. Geralmente, todas as *shells* permitem ao engenheiro do conhecimento definir as prioridades das regras.

Quando ativações diferentes possuem a mesma prioridade e a máquina de inferência tem que decidir qual delas deve ser inicializada, diz-se ter um conflito na agenda. As *shell's* desenvolvidas procuraram resolver esse impasse de maneiras distintas. No paradigma original de Newell e Simon, as regras que entram primeiro no sistema tem maior prioridade. No sistema OPS5, regras com padrões mais complexos possuem maior prioridade. Em ART, Kappa-PC e CLIPS, as regras possuem a mesma prioridade a menos que o engenheiro do conhecimento as redefina.

Neste momento, o controle é retornado para o comando *top-level* do interpretador para o usuário dar instruções para o sistema. O comando *top-level* ou de alto nível é o modo *default* onde o usuário se comunica com o sistema.

O *top-level* é o interface com o usuário. Interfaces com o usuário mais sofisticados são usualmente projetados para facilitar a operação do Sistema Especialista. Um Sistema Especialista projetado para a operação, supervisão e diagnóstico de falhas para uma subestação de energia elétrica pode possuir o diagrama elétrico unifilar do sistema de domínio, com riqueza de detalhes e exteriorização dos dados necessários para uma nítida visualização do estado geral do sistema, com uma boa resolução, *display* colorido etc.

Dependendo da capacidade e do campo de aplicação do Sistema Especialista, o mesmo poderá ser implementado por regras, *frames* ou outra linguagem desenvolvida especificamente para Sistemas Especialistas.

Uma facilidade de explanação poderá ser disponibilizada para o usuário com vistas a exteriorizar o raciocínio do Sistema Especialista para chegar a solução recomendada. Em um Sistema Especialista baseado em regras de produção, não será difícil implementar essa facilidade, visto que a seqüência, bem como as regras ativadas no processo poderão ser memorizadas. A facilidade da explanação poderá também decorrer na facilidade da exploração de caminhos alternativos para a busca dos resultados possíveis, em casos de raciocínios alternativos.

3.2.4 SISTEMAS BASEADOS EM REGRAS DE PRODUÇÃO

Os Sistemas Especialistas baseados em regras de produção se tornaram popular pelas seguintes razões:

- | | |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sua natureza modular: | é muito fácil nesses sistemas, o encapsulamento do conhecimento bem como sua expansão. |
| Facilidade de explanação: | é fácil a construção da facilidade de explanação dos raciocínios que levaram a dada conclusão, isto porque os antecedentes de uma regra são necessários para desencadear sua ativação. |
| Similaridade com o processo cognitivo do ser humano: | baseado no trabalho de Newell e Simon, regras parecem ser um modo natural de se modular o raciocínio humano na busca da solução de um problema. A simples representação da notação <i>If...Then</i> para a |

materialização das regras torna fácil a representação do conhecimento do especialista na forma de regras de produção.

Sistemas de produção foram inicialmente usados em lógica simbólica por Post em 1943 o que originou o nome de *Sistemas de Produção Post*, o qual demonstrou a eficácia da representação de um sistema matemático ou lógico por um sistema de regra de produção. Os resultados dessa pesquisa dimensionaram o largo emprego de Sistemas Especialistas baseados em regras de produção.

A idéia básica de Post era de que um sistema matemático ou lógico é simplesmente um conjunto de regras especificando como fazer uma dada mudança de *string* de símbolos em um outro conjunto de símbolos, ou seja, dado um conjunto de símbolos de entrada, ou antecedentes, uma regra de produção poderia produzir uma nova *string*, ou conseqüente, ou seja, como exemplo, se as *strings* de entrada são **falha no equipamento carrier** e **falha no equipamento de tom de teleproteção** a *string* de saída poderia ser, *equipamento OPLAT com defeito*. Notemos que não é levado em conta o significado das *strings*, ou seja, sua manipulação é baseada na sintaxe e não na semântica ou no entendimento do que representa o equipamento *carrier* ou o equipamento de tom de teleproteção ou mesmo o que significa OPLAT. Para tal, o conhecimento do mundo que nos cerca é de vital importância e ele poderia ser descrito através da sintaxe das regras de produção conforme abaixo:

If há falha no equipamento de Tom de Teleproteção
And há falha no equipamento *Carrier*
Then equipamento OPLAT com defeito

Esse é um típico caso de múltiplos antecedentes.

Um sistema **Post** de produção consiste de um grupo de regras de produção conforme abaixo[4]:

- (1) o carro não partiu - cheque a bateria
- (2) o carro não partiu - cheque o combustível
- (3) checada a bateria **AND** bateria está com problema **THEN** substitua a bateria
- (4) checado o combustível **AND** o tanque está vazio **THEN** encha o tanque de gasolina

Se há uma *string* *o carro não partiu* as regras 1 e 2 podem ser usadas para gerar as *strings* *cheque a bateria* e *cheque o combustível*. Porém, não há um mecanismo de controle que aplique ambas essas regras para a *string*. Somente uma regra pode ser aplicada de cada vez. Se há uma outra *string* *checada a bateria* e outra *string* *bateria está com problema*, então a regra 3 pode ser aplicada para gerar a *string* *substitua a bateria*

A ordem com que as regras são escritas não tem muita importância.

Embora as regras Post de produção tenham sido importantes para o estudo de sistemas especialistas baseados em regras de produção, elas não se mostraram adequadas para a implementação de programas de Sistemas Especialistas, pela falta de uma estratégia de controle mais adequada para as regras de produção, tornando o processamento muito lento.

3.2.4.1 ALGORITMOS DE MARKOV

Markov foi o responsável pela especificação de uma estrutura de controle para sistemas de produção. O algoritmo de Markov é um grupo ordenado de produção os quais são aplicados na ordem de prioridade das *strings* de entrada. Se a regra de maior prioridade não é aplicada, então a próxima é aplicada e assim sucessivamente. O algoritmo de Markov termina se a última produção não é aplicável a *string* ou se uma produção que finaliza com um período é aplicado (*flag*).

O algoritmo de Markov também pode ser aplicado para uma *substring* de uma *string*, começando da esquerda, ou seja, dada uma *string* AB - HIJ. Quando aplicado para a *string* de entrada GABKAB produz a nova *string* GHIJKAB.

O caractere especial \wedge representa a *string* nula. A regra A - \wedge apaga todas as ocorrências do caracter A na *string*.

Outros símbolos especiais representam um caracter simples e são indicados pelas letras a, b, c e sucessivamente. Estes símbolos representam caracteres simples, variáveis e são uma parte importante da linguagem dos Sistemas Especialistas modernos. Por exemplo a regra AxB - BxA dará o inverso dos caracteres A e B.

As letras gregas α , β e sucessivamente, são usadas para especiais pontuações entre as *strings*. As letras gregas são usadas porque são distintas do alfabeto arábico.

Um exemplo do algoritmo de Markov que move a primeira letra de uma *string* de entrada para o final da *string* é mostrada a seguir, onde as regras são ordenadas em função da escala de prioridades. As regras são priorizadas em função de sua ordem de entrada.

- (1) $\alpha xy - y\alpha x$
- (2) $\alpha - \wedge$
- (3) $\wedge - \alpha$

Para a *string* de entrada ABC, a execução é mostrada na tabela a seguir:

Tabela 3.1 – Um exemplo de algoritmo de Markov

REGRA	SUCESSO OU FALHA	STRING
1	F	ABC
2	F	ABC
3	S	α ABC
1	S	B α AC
1	S	BC α A
1	F	BC α A
2	S	BCA

Notemos que o símbolo α atua analogamente a uma variável temporária em uma linguagem de programação, porém ao invés de se manter com um valor único ela é usada para marcar um local com vistas a progressão das mudanças da *string* de entrada. Cumprida sua função, a variável α é eliminada pela regra 2. O programa termina quando a regra 2 é aplicada desde que haja um ciclo após a sua aplicação.

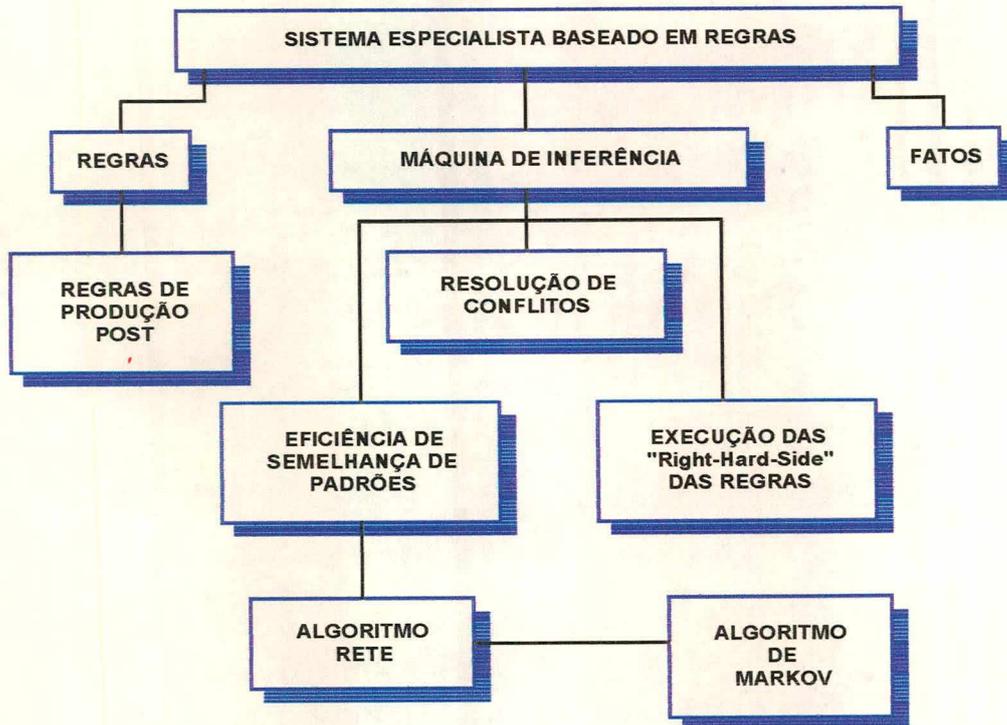
3.2.4.2 O ALGORITMO “RETE”

Há uma estratégia definida no algoritmo de Markov em função das regras de maior prioridade. Tanto quanto se necessite, as regras de maior prioridade são utilizadas, caso contrário, é selecionada a regra de prioridade imediatamente inferior e assim sucessivamente. Esse procedimento traz uma grande ineficiência para Sistemas Especialistas com muitas regras, uma vez que para cada inferência, todas as regras serão verificadas, perdendo-se em tempo de processamento. Esse problema ficará mais acentuado se quisermos implementar Sistemas Especialistas com centenas ou milhares de regras. A solução desse impasse passaria pela criação de um sistema que possua algum conhecimento das regras de vez que não precise passar por todas elas de forma sequencial para fazer a inferência.

Charles L. Forgy, na Carnegie-Mellon University, em 1979, em sua tese de Phd, desenvolveu o algoritmo de RETE. O algoritmo de Rete é um modelo muito veloz, que obtém velocidade pelo armazenamento da informação sobre as regras, na rede. Ao invés de buscar as semelhanças dos fatos em todas as regras em todos os ciclos de reconhecimento das ações, o algoritmo Rete somente procura por trocas semelhantes em todos os ciclos. Isto aumenta em muito a velocidade da busca das semelhanças dos fatos para os antecedentes desde que os dados estáticos que não mudam de ciclo para ciclo possam ser ignorados.

Posteriormente os fundamentos do algoritmo Rete foram trabalhados e deram origem as modernas tecnologias para Sistemas Especialistas baseados em regras de produção, sumarizadas na figura a seguir.

Figura 3.7 – Sumário de um Sistema Especialista baseado em Regras de Produção



Diferentes versões da linguagem OPS desenvolvida por Charles L. Forgy foram desenvolvidas semelhante a OPS2, OPS4 e OPS5. A versão comercial mais recente é a OPS83, sendo uma *shell* muito veloz. Essas versões possuem diferenças em suas sintaxes.

3.2.5. PROGRAMAÇÕES PROCEDURAIS E NÃO PROCEDURAIS

Um algoritmo é um método de solução de problemas a partir de um número finito de passos. Programações que se servem desse método são conhecidos como programação algorítmica ou programação procedural ou ainda como programação convencional. Essas nomenclaturas existem basicamente com o fito de diferenciar o processo de programação de Inteligência Artificial dos demais métodos.

Os programas procedurais são comumente seqüenciais, muito embora as linguagens modernas sempre permitam implementações recursivas. Nos programas procedurais, todos os passos devem ser previamente definidos pelo programador, e o caminho para a solução do problema deve ser codificado pelo programador.

O objetivo maior de um programa não procedural é que uma vez estabelecidos os objetivos pelo programador, o programa, por si só, determinará o caminho mais viável para o seu atingimento, normalmente, perseguindo os paradigmas dos raciocínios humanos para as soluções dos problemas, daí o nome de Inteligência Artificial.

As linguagens procedurais, quando formadas por comandos que dizem à máquina o que fazer e adicionalmente possuem uma rígida estrutura de controle, são também conhecidas como programações imperativas. Linguagens imperativas, como "C", tem sido utilizada para o desenvolvimento de *shell* para a construção de Sistemas Especialistas.

Linguagens procedurais imperativas não são eficientes para serem utilizadas diretamente na implementação de Sistemas Especialistas, principalmente se o sistema é baseado em regras de produção, visto a característica seqüencial das linguagens convencionais, isto devido ao tempo necessário para o reconhecimento das ações associadas às regras. Para a diminuição desse tempo, poderiam ser construídos uma árvore de padrões de regras, o que facilitaria a identificação das regras a serem ativadas. Existem no mercado *shells* para desenvolvimento de Sistemas Especialistas, cuja construção de regras são realizados com uma sintaxe fácil e seus agendamentos realizados pelo programa de forma automática.

Em programas não procedurais, o programador não precisa implementar detalhes exatos de como um problema deve ser resolvido. Caberá ao sistema o encaminhamento do raciocínio para a sua solução. O paradigma declarativo dissocia o objetivo dos meios a serem utilizados para o seu atingimento. Caberá ao usuário a indicação do objetivo, enquanto caberá ao sistema procurar atingi-lo.

A programação orientada ao objeto é um paradigma considerado por muitos autores como uma técnica declarativa e imperativa ao mesmo tempo. A idéia básica da programação orientada ao objeto é o desenvolvimento de programas considerando os dados usados no programa como objetos e então implementando operações com esses objetos, dando uma idéia de encapsulamento por classes de objetos, possibilitando a implementação de conceitos poderosos como o da herança.

A técnica de programação orientada ao objeto está se disseminando em nossos dias, principalmente no desenvolvimento de aplicativos comerciais.

3.3. COMO REPRESENTAR O CONHECIMENTO

Uma boa representação faz com que a operação de um programa de raciocínio seja não apenas correta, mas trivial [6].

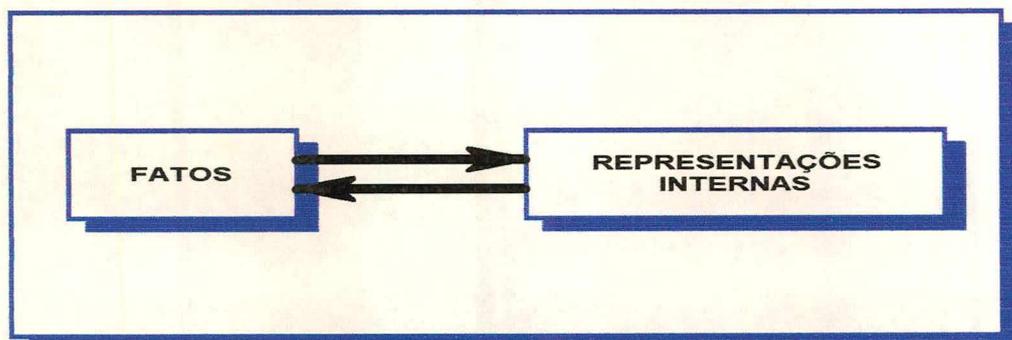
Antes de iniciarmos a modelagem do protótipos, é importante a compreensão do que seja um *fato* bem como sua representação. Um fato, é uma verdade dentro do mundo do problema, e se

constitui no objeto que precisaremos representar. A representação dos fatos ou verdades constituirão os objetos que poderão efetivamente ser manipulado pelo sistema.

Essas entidades podem ser estruturadas em dois níveis, quais sejam, o *nível do conhecimento* e o *nível do símbolo*.

É no nível do conhecimento que os fatos podem ser descritos e é no nível dos símbolos que esses objetos podem ser manipulados pelo programa.

Figura 3.8 – Relação bidirecional entre os fatos e suas representações internas

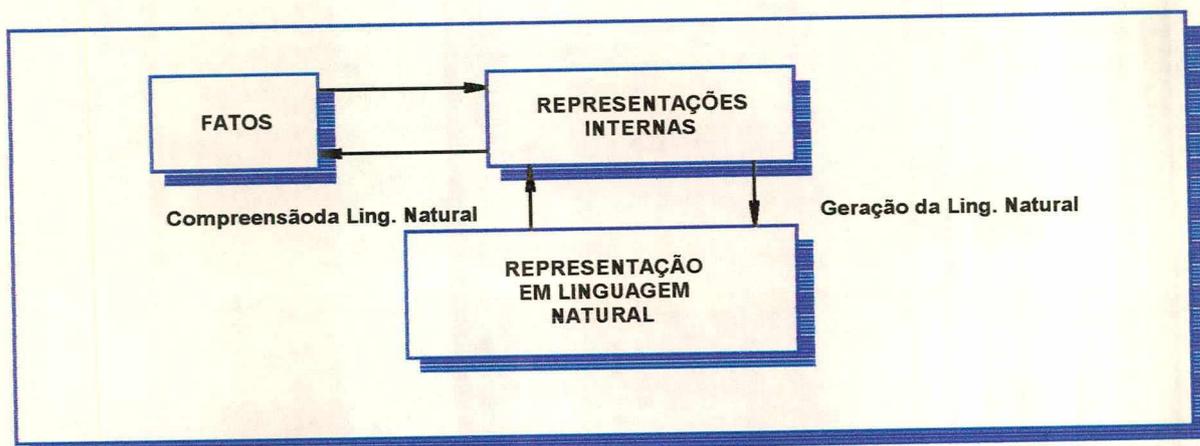


O mapeamento de representações consiste na relação bidirecional entre os fatos e suas representações internas, como representado na figura acima. O mapeamento de representações para a frente vai dos fatos para as representações. O mapeamento da representação para trás atua em sentido contrário, da representação para os fatos [6].

Na representação do conhecimento no que concerne a implementação de Sistemas Especialistas, é muito importante a representação de fatos expressos em linguagem natural. Para isso, precisaremos usar as funções de mapeamento de frases para a representação que teremos eventualmente que usar, e a recíproca deverá ser verdadeira.

A figura 3.9 mostra como estas três entidades relacionam-se entre si.

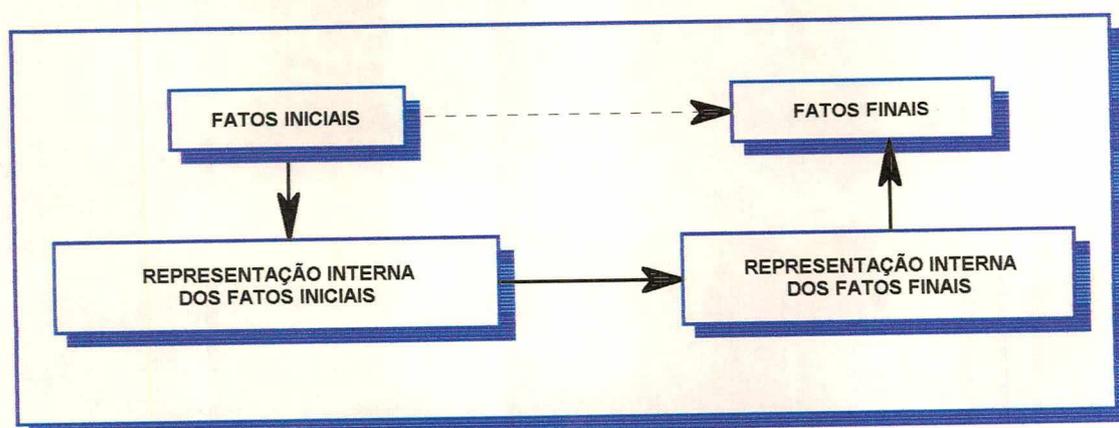
Figura 3.9 – Relacionamento entre os fatos, representações internas e representação em Linguagem Natural



Normalmente, as funções de mapeamento apresentam relacionamento genérico, ou seja, cada objeto do domínio do problema pode mapear vários elementos daquela categoria, e vários elementos do domínio do problema podem mapear o mesmo elemento da categoria. Assim, quando tentarmos converter frases da linguagem natural para alguma outra representação, precisamos primeiro decidir que fatos as frases representam e depois converter esses fatos em novas representações. O que um programa de Inteligência Artificial faz é manipular as representações internas dos fatos que lhe são dados. Essa manipulação deve resultar em novas estruturas que também podem ser representadas como representações internas de fatos.

Damos abaixo um esquema mais completo do mapeamento da representação do conhecimento [6].

Figura 3.10 – Mapeamento de representação do conhecimento



Na parte superior temos uma linha pontilhada que representa o processo de raciocínio abstrato que um programa pretende modelar. A linha contínua na parte inferior representa o processo de raciocínio concreto que um determinado programa realiza. Esse programa modela com sucesso o processo abstrato no sentido de que, quando o mapeamento da representação para trás é aplicado ao resultado do programa, os fatos finais são gerados. Se a operação do programa ou um dos mapeamentos de representação não for fiel ao problema que está sendo modelado, então os fatos finais provavelmente não serão os desejados. Em caso da falha de um desses passos, a resposta final não refletirá a resposta real para o problema.

O grande objetivo da representação do conhecimento, é basicamente o de encontrar implementações concretas de conceitos quase sempre abstratos.

Um sistema eficiente de representação do conhecimento em um domínio, deve possuir as seguintes características[6]:

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adequação representacional: | capacidade de representar todos os tipos de conhecimento necessários naquele domínio. |
| Adequação inferencial: | capacidade de manipular as estruturas representacionais de modo a derivar novas estruturas que correspondam a novos conhecimentos, inferidos a partir de conhecimentos antigos. |
| Eficácia inferência: | capacidade de incorporar à estrutura de conhecimento, informações adicionais que podem ser usadas para focalizar a atenção dos mecanismos de inferência nas direções mais promissoras. |
| Eficácia aquisitiva: | capacidade de adquirir novas informações facilmente. O caso mais simples envolve a inserção direta, por meio de uma pessoa, de novos conhecimentos na base de dados. Idealmente o próprio programa deveria ser capaz de controlar a aquisição de conhecimentos. É claro que inexistente um sistema que reúna todas essas características para todos os tipos de conhecimentos, logo, foram desenvolvidas várias técnicas para a representação do conhecimento. Um programa pode basear-se em várias técnicas. |

3.4. MODELAGEM DO PROTÓTIPO SODF

3.4.1. UMA SUBESTAÇÃO HIPOTÉTICA

Para a implementação do software protótipo do Sistema Especialista, que objetiva a integração das funções de supervisão, operação e apoio a decisão, foi modelada uma subestação inspirada na subestação de Palhoça do sistema Eletrosul.

A subestação de Palhoça é uma subestação convencional que já possui algum nível de automação, tais como os intertravamento dos equipamentos e os comandos dos disjuntores e chaves seccionadoras a partir da mesa de comando na Casa de Controle.

Essas funções são atendidas através de dispositivos estáticos e eletromecânicos.

Em subestações já digitalizadas, a maioria das funções são realizadas utilizando-se de equipamentos microprocessados, cujas lógicas são implementadas por *softwares*, trazendo à operação do sistema uma nova cultura.

As funções em uma subestação são quase sempre genéricas, se prestando a serem implementadas tanto através de lógicas de contatos quanto através de recursos computacionais. Na grande maioria, as subestações existentes e já digitalizadas se constituem ainda em sistemas híbridos, havendo ainda algumas funções implementadas convencionalmente.

Como regra geral, as funções em uma subestação são:

- Monitoração de “*status*” de equipamentos.
- Medição.
- Proteção de linha, transformadores, barra, reator, perda de sincronismo etc.
- Supervisão das proteções.
- Religamento automático.
- Localização de falha na linha.
- Telecomandos.
- Proteção de falha de disjuntor.
- Intertravamentos.
- Monitoração de sobrecarga em transformadores.
- Controle de tensão.
- Fluxo de reativos.
- Corte seletivo de cargas.
- Sincronização.
- Alarmes em geral.
- Registro de seqüência de eventos.
- Oscilografia.

- Interface homem-máquina.
- Impressão de relatórios.
- Interface com os Centros de Operação de Sistema.
- Autodiagnose.

Em geral, para a execução dessas funções, o sistema se organiza a partir de um núcleo central, um núcleo de aquisição de dados, dispositivos de interface com o processo e unidades especializadas.

A complexidade do núcleo central dependerá do grau de automatismo requerido.

Nas subestações desassistidas, é usual a implementação de comandos locais como uma redundância a partir de uma estratégia de operação enquanto que nas subestações assistidas, é usual a migração de um grande número de informações para os Centros Regionais de Operações com vistas a prover ao Centro de Operação Remoto o “status” de escuta do sistema.

As funções a serem implementadas, devem sobretudo, levar em conta o requisito tempo e velocidade de processamento, visto que elas podem diferir de função para função, portanto, esses dados devem ser aquisitados observando-se essas exigências, cujo resumo segue abaixo [1]:

Tabela 3.2 – Tempo requerido para os eventos

EVENTO	TEMPO REQUERIDO
- Sincronização	1 ms
- Registro de eventos	50 ms
- Proteção	80 ms
- Regulação de tensão	800 ms
- Religamento	3 seg
- Medição e exteriorização das grandezas	80 seg
- Interface homem-máquina	100 seg

Dependendo de requisitos de tempo, deve-se coletar o valor instantâneo ou o valor eficaz das variáveis com maior ou menor velocidade, podendo justificar equipamentos dedicados para as funções mais rápidas [1].

O tempo para a implementação de um sistema que objetive a integração da operação, supervisão e diagnóstico de falhas é demasiadamente longo, assim, nos deteremos apenas a implementação dos módulos necessários para o apoio a decisão com vistas a operação de uma subestação levando em conta os intertravamentos entre os equipamentos envolvidos, considerando uma lógica real, o qual poderá se prestar sobretudo, para o treinamento de operadores. Para uma melhor compreensão, iniciaremos mostrando os arranjos físicos mais utilizados, de subestações.

3.4.1.1. ARRANJOS FÍSICOS DE SUBESTAÇÕES

Dá-se o nome de arranjo de uma subestação ao seu *lay-out*, ou seja, as formas de se conectarem entre si, linhas, transformadores e cargas de uma subestação.

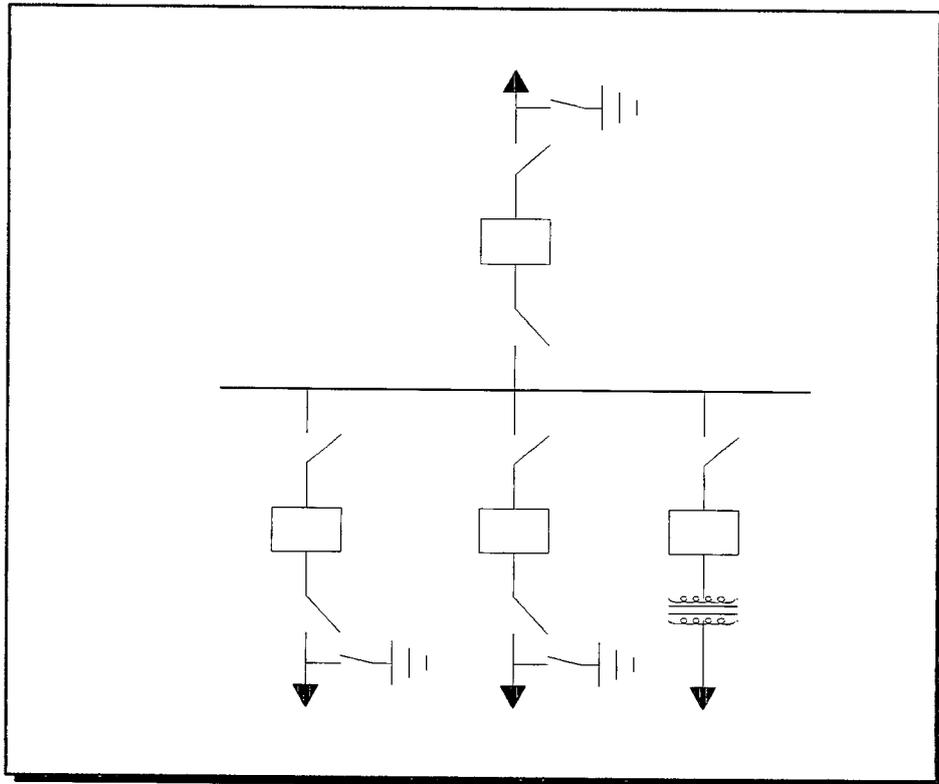
Vale salientar que o disjuntor permite abrir ou fechar o circuito com carga, enquanto que as chaves seccionadoras somente podem operar sem carga.

As chaves de aterramento somente podem ser operadas quando a Linha está desenergizada e é utilizada para que se evitem energizações indesejadas do *bay*, localizado no extremo oposto, como também para eliminação das induções devido a proximidade de Linhas ou em função de sobretensões de origem atmosféricas, as quais podem assumir valores perigosos.

Os principais arranjos são:

a) BARRA SINGELA - DISJUNTOR SINGELO

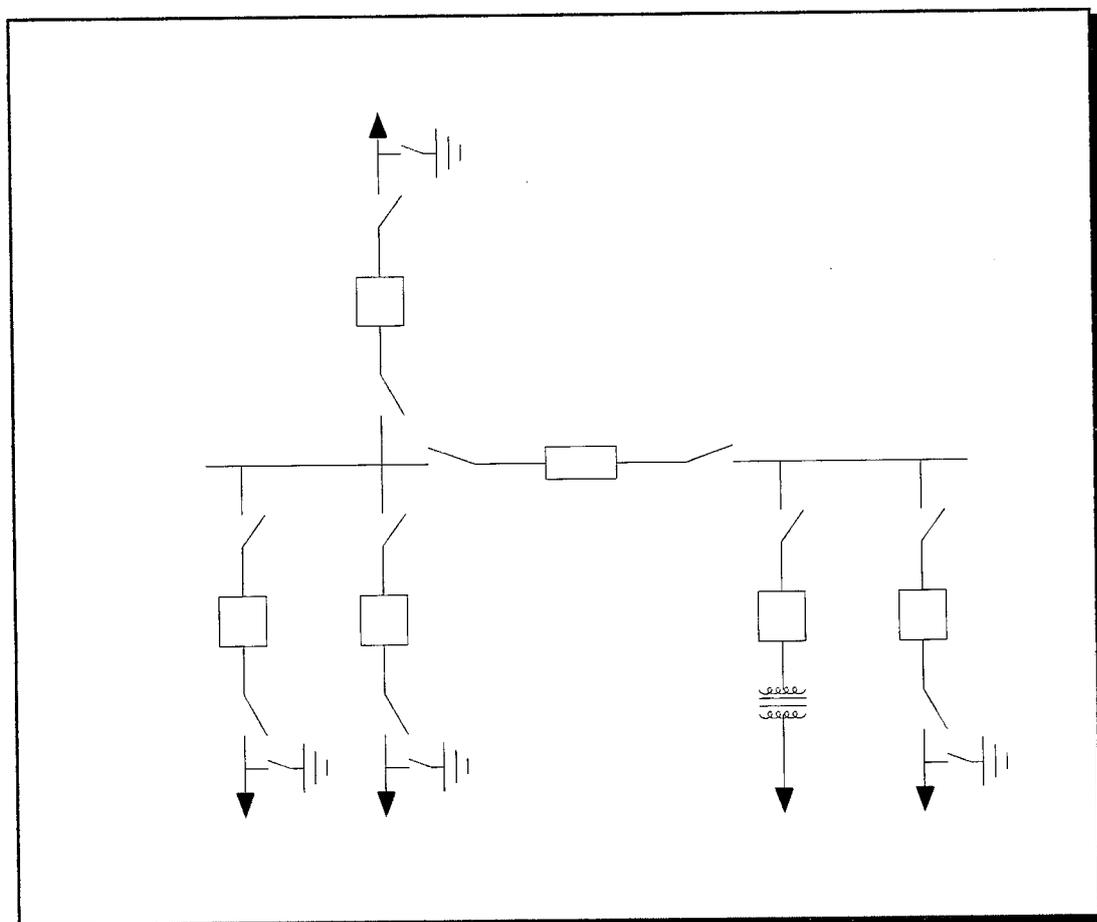
Figura 3.11 – Arranjo barra singela - disjuntor singelo



Nesse esquema, todos os circuitos se conectam a uma mesma barra e por decorrência, todos devem ser desligados na presença de defeito na barra.

Devido a essa limitação, esse arranjo somente é utilizado em subestações de pequena importância. Caso se deseje alguma seletividade, podemos seccionar o barramento utilizando-se um disjuntor e duas seccionadora, conforme esquema a seguir:

Figura 3.12 – Arranjo barra singela – disjuntor singelo modificado

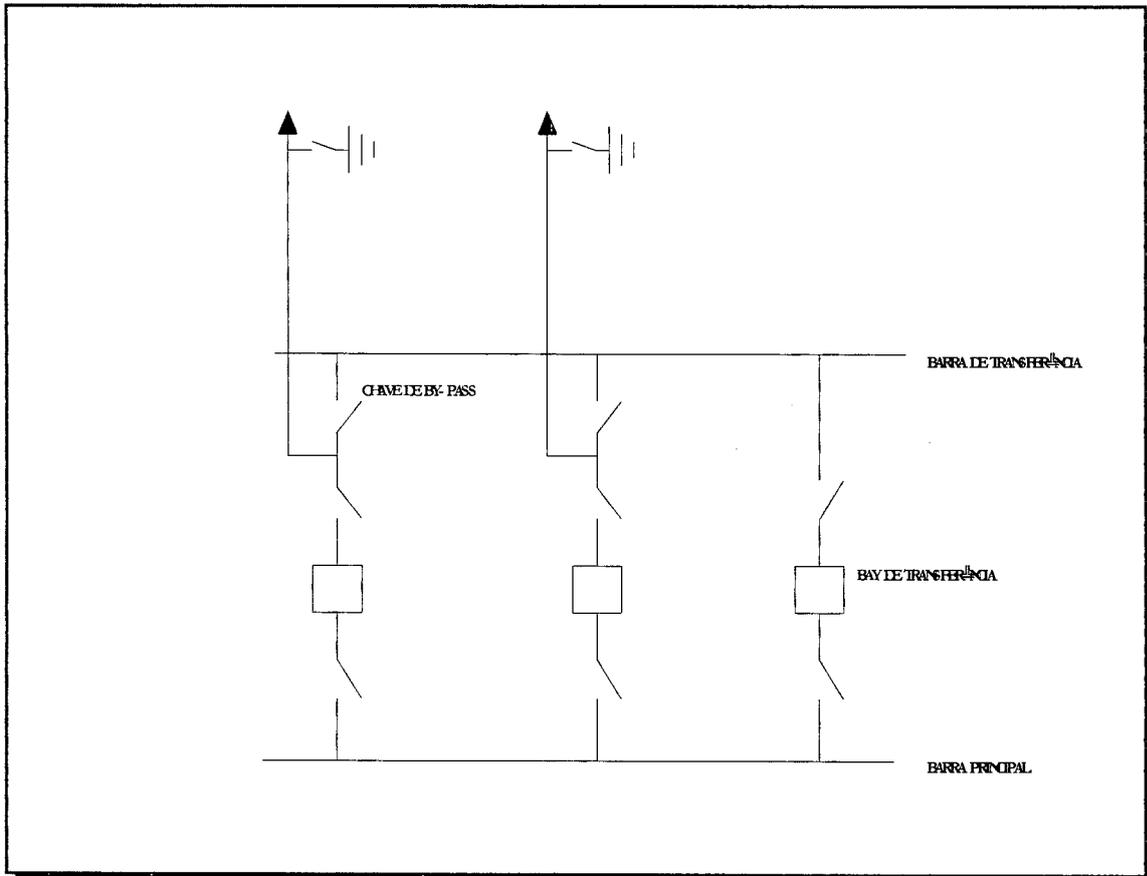


A presença das seccionadoras contíguas ao disjuntor tem por finalidade a isolação do mesmo para fins de manutenção.

Uma outra limitação nesse esquema, é que quando se está fazendo manutenção em um disjuntor (ou chave seccionadora), o circuito associado tem de ser desligado.

b) BARRA PRINCIPAL E TRANSFERÊNCIA

Figura 3.13 – Arranjo barra principal e transferência

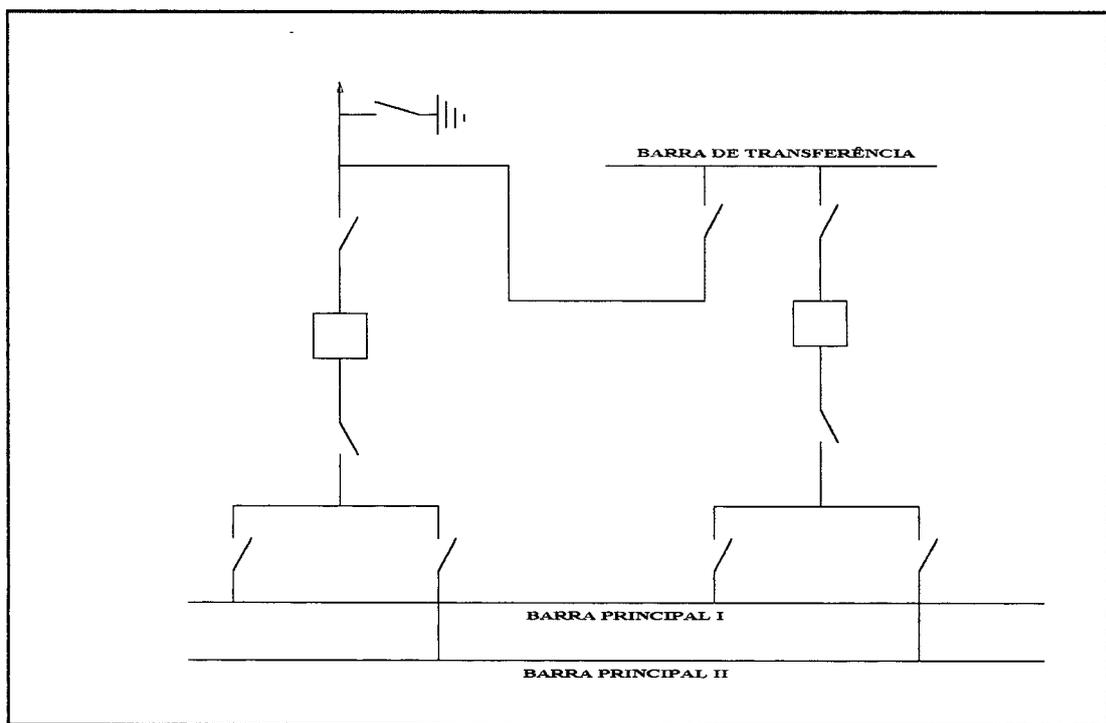


Havendo necessidade de não se desligar o circuito durante a manutenção nos equipamentos associados, pode-se partir para o arranjo acima.

Quando da transferência de qualquer um dos *bay's* para o *bay* de transferência, deve-se passar a chave de transferência para a posição de *intermitente*, quando então, a proteção passará a atuar simultaneamente nos disjuntores dos *bay's* envolvidos na operação, em seguida, fecha-se a chave de *by-pass* correspondente e as chaves seccionadoras do *bay* de transferência, depois, fecha-se o disjuntor do *bay* de transferência. Isola-se o disjuntor do *bay* transferido através da abertura das chaves seccionadoras associadas, e passa-se a chave de transferência da proteção para a posição *transferido*, fazendo com que a proteção somente atue no disjuntor do *bay* de transferência.

c) BARRA PRINCIPAL DUPLA E BARRA DE TRANSFERÊNCIA

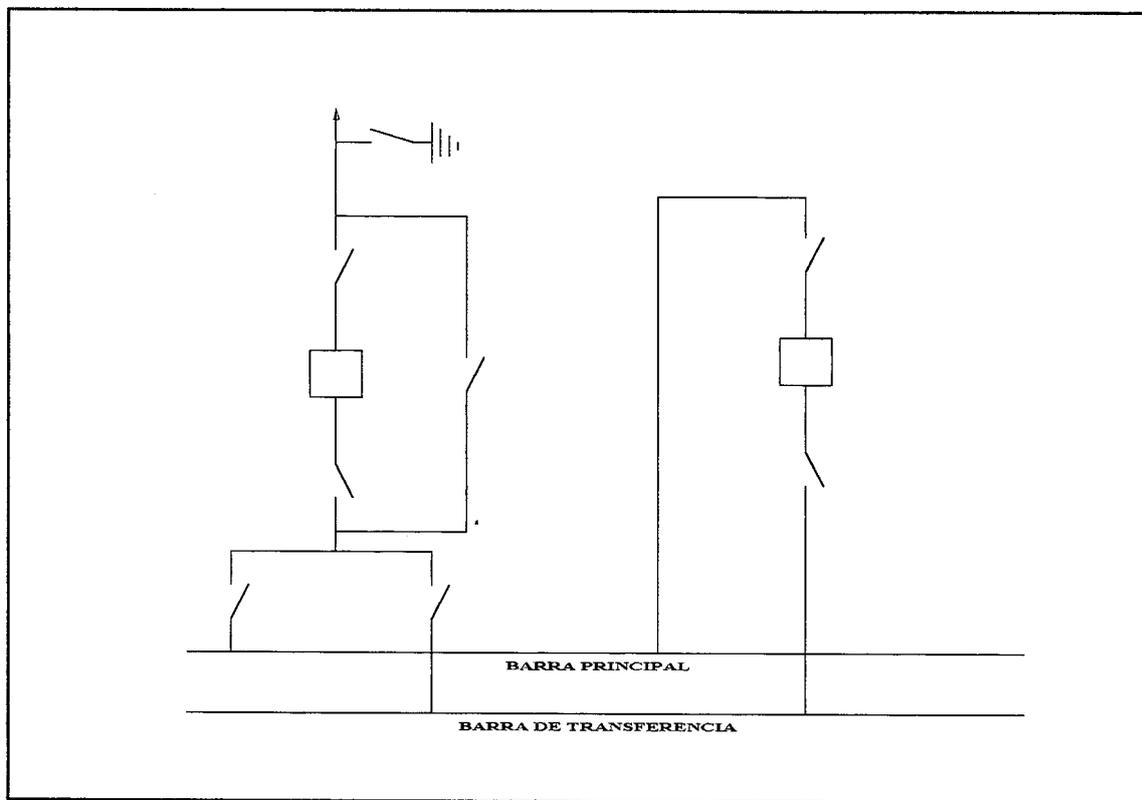
Figura 3.14 – Arranjo barra principal dupla e barra de transferência



Conforme *lay-out*, o *bay* poderá estar conectado à barra principal I ou II, e para a manutenção do disjuntor associado, deve-se transferir o circuito para a barra de transferência via disjuntor de transferência.

Esse arranjo, por não ser de fácil visualização, fator preponderante para a operação, pode ser substituído pelo arranjo a seguir, o qual possui uma barra a menos e oferece as mesmas facilidades.

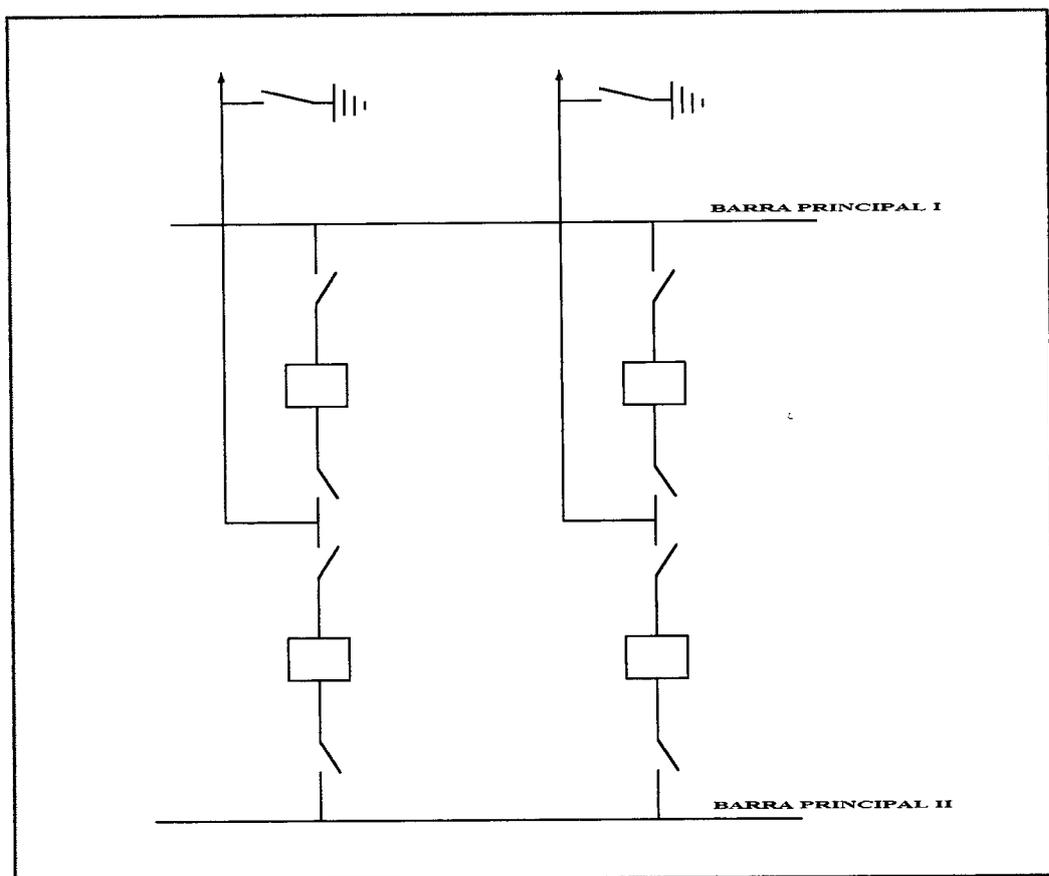
Figura 3.15 – Arranjo barra principal dupla e barra de transferência modificado



d) BARRA DUPLA - DISJUNTOR DUPLO

Todos os arranjos vistos até aqui, possuem apenas um disjuntor por circuito, porém, quando se busca uma maior confiabilidade, faz-se mister um maior investimento em equipamentos. Esse arranjo costuma ser utilizado em subestações de extra-alta tensão.

Figura 3.16 – Arranjo barra dupla disjuntor duplo

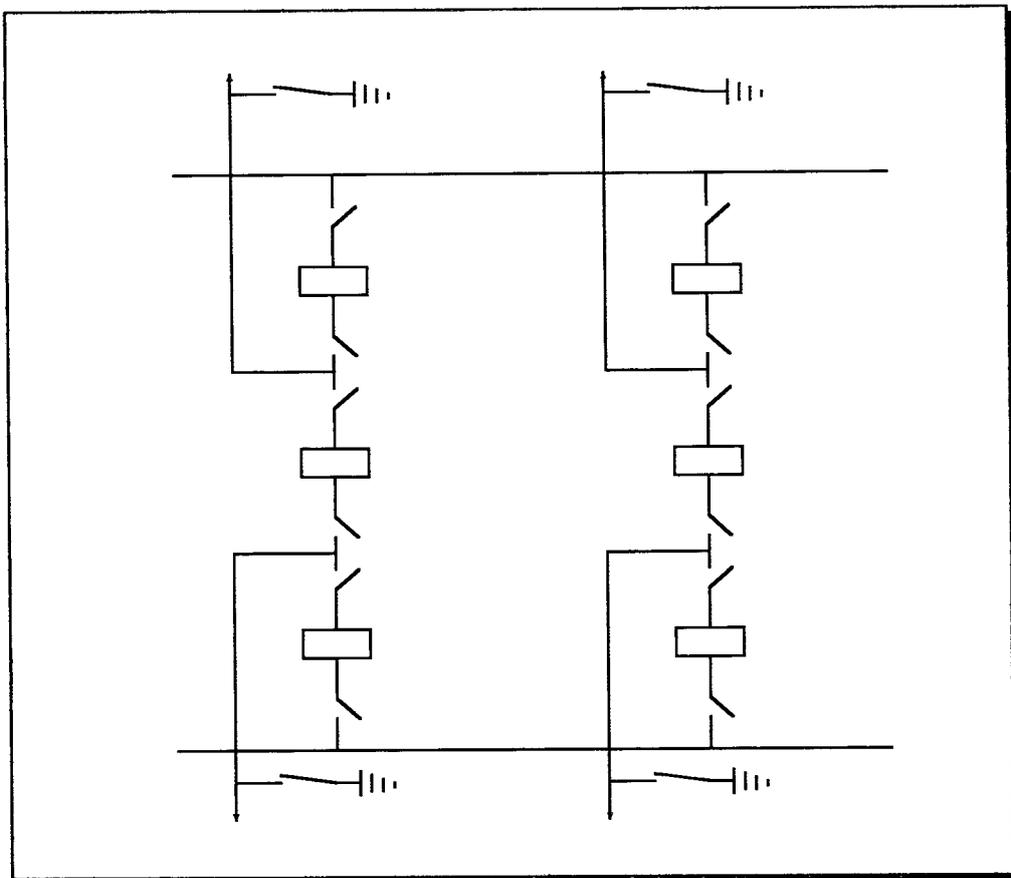


No arranjo acima, normalmente, os barramentos principais I e II trabalham em paralelo. No caso de necessidade de manutenção em um dos disjuntores, o circuito permanecerá conectado aos barramentos através do outro disjuntor associado ao vão.

e) DISJUNTOR E MEIO

Com vistas a redução de custos de implantação, o esquema anterior evoluiu para o arranjo *disjuntor e meio*, o qual mantém praticamente todas as vantagens do arranjo anterior.

Figura 3.17 – Arranjo disjuntor e meio



Esse arranjo foi adotado no Brasil para quase todas as concessionárias de energia, para subestações a céu aberto, nas classes de tensões de 525 kV e 750 kV.

3.4.1.2. FUNÇÕES

A título ilustrativo, damos a seguir os esquemas mais usuais utilizados para a proteção e medição de um vão de linha, vão de transformadores, serviços auxiliares de Corrente Alternada e Corrente Contínua, com a indicação dos principais relês e respectivas funções [1].

1) PROTEÇÃO E MEDIÇÃO DE UM VÃO DE LINHA

Figura 3.18 – Proteção e medição de um vão de linha

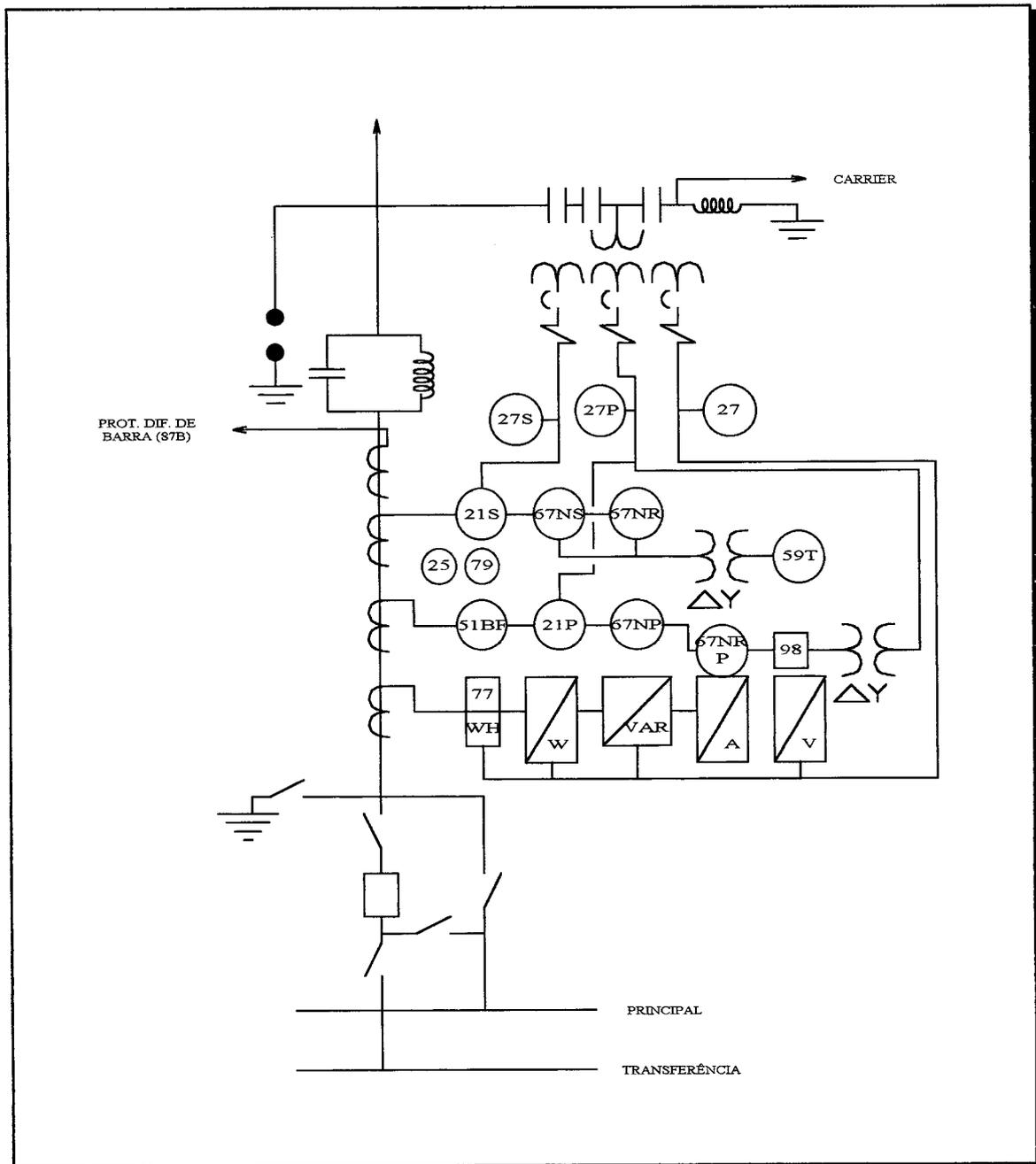


Tabela 3.3 - Funções de relês

CÓDIGO	FUNÇÃO
21	impedância (“ <i>start</i> ” ou “ <i>pilot</i> ”)
25	sincronismo
27	subtensão
51BF	falha de disjuntor
59	sobretensão
67	sobrecorrente direcional
79	religamento
87	sobrecorrente direcional
98	oscilografia

OBS: N = neutro; P = principal; S = secundário; R = retaguarda.

2) PROTEÇÃO E MEDIÇÃO PARA VÃO DE TRANSFORMADOR

Figura 3.19 – Proteção e medição de um vão de transformador

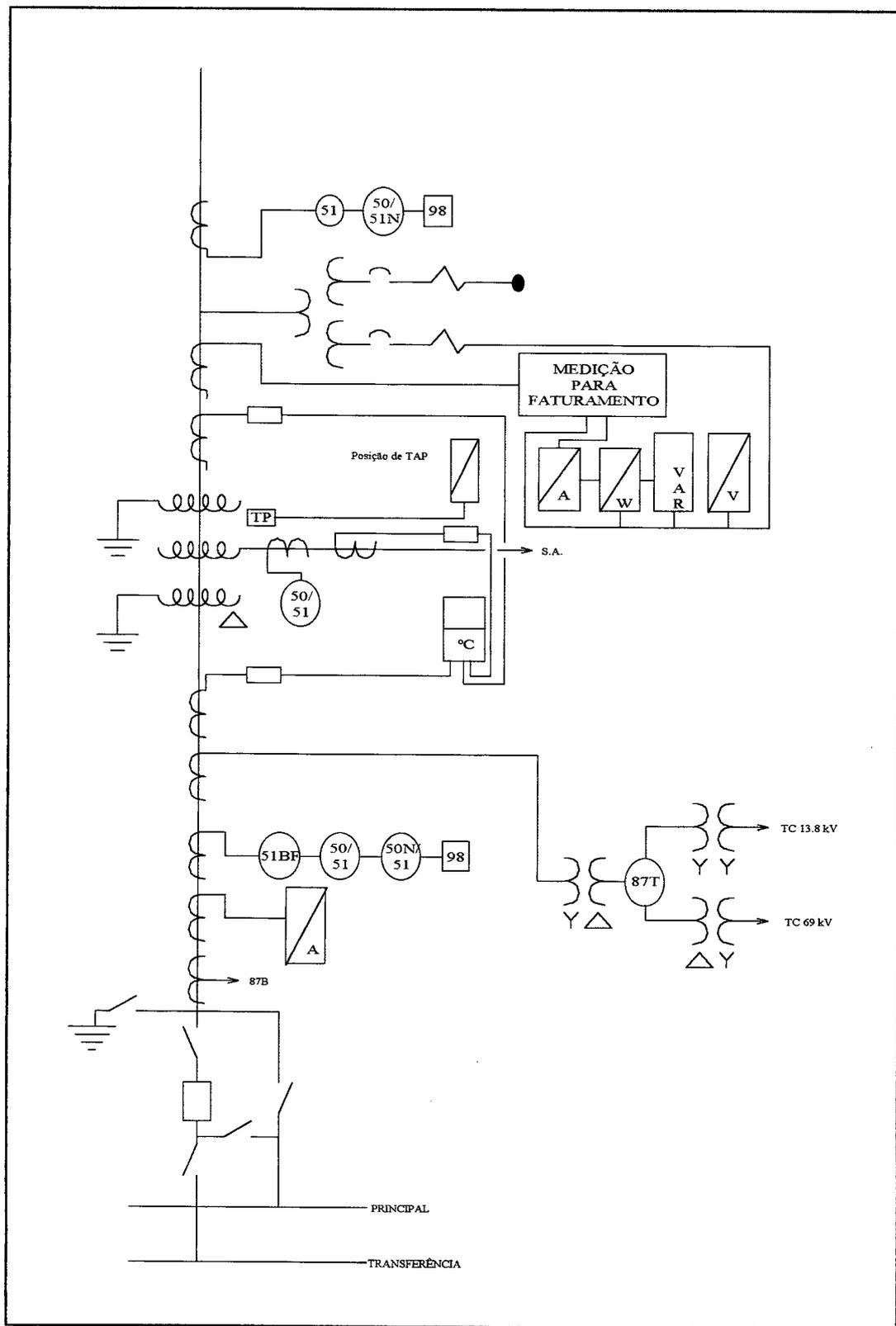


Tabela 3.4 – Funções de relês

CÓDIGO	FUNÇÃO
50	sobrecorrente
26	temperatura do óleo
49	temperatura do enrolamento
63	pressão do gás
63C	pressão do gás no comutador
71	nível do óleo
VS	válvula de segurança
87T	diferencial do transformador
87B	diferencial da barra
98	oscilografia

4) FUNÇÃO DE SINALIZAÇÃO

Nesse bloco de funções, temos as que descrevem o estado dos equipamentos de manobras da subestação, tais como disjuntores e chaves seccionadoras, bem como daquelas que integram os Serviços Auxiliares, as quais devem ser exteriorizadas em tela de vídeo para possibilitar uma visualização rápida e panorâmica com vistas a operação correta e segura do sistema. Para a viabilização dessas funções, os equipamentos tais como disjuntores e chaves seccionadoras possuem contatos auxiliares (fim de curso), os quais são comumente associados a Relês Auxiliares multiplicadores de contatos, os quais são lidos através de entradas digitais na Unidade de Aquisição de Dados (UAC). Esses *status* são exteriorizados no diagrama unifilar da subestação ou ainda no diagrama unifilar dos Serviços Auxiliares, com os equipamentos representados por símbolos.

Normalmente, a mudança de estado é indicada com a modificação do símbolo ou da sua cor. Pode-se associar a cor verde ao estado do equipamento *ligado* e a cor vermelha ao estado do equipamento “desligado”. Quanto a chave seccionadora, normalmente indica-se o contato móvel aberto para o equipamento *aberto* e fechado com o equipamento no estado *fechado*, podendo-se adicionalmente, associar as cores verde e vermelho ao símbolo da chave seccionadora.

Comumente se monitora o estado dos seguintes equipamentos, em subestações:

- . disjuntores
- . chaves seccionadoras
- . principais contadores do Sistemas Auxiliar de Corrente Alternada e Corrente Contínua.

Com vistas a segurança das informações na monitoração de chaves seccionadoras e disjuntores, é comum utilizar-se simultaneamente um contato Normalmente Aberto e outro Normalmente Fechado e durante a aquisição se verifica a coerência dessas informações.

É comum em sistemas digitais, se monitorar tensões e correntes para a confirmação das informações demandadas pelo fim de curso.

Com exceção dos disjuntores, o tempo de mudança de estados desses equipamentos são maiores que 100 ms, logo, a unidade que aquisita esses dados não precisa ter alta resolução, daí, 10 a 20 ms de resolução já atende a esse requisito.

Os demais parâmetros que indicam o funcionamento normal dos equipamentos, tais como pressão de gás SF₆, pressão do óleo hidráulico, estado das bombas para circulação do óleo, ventilação forçada em transformadores, estados de chaves de comando, de transferência etc., também podem ser enquadrados nos requisitos constantes no parágrafo anterior.

5) FUNÇÃO DE MEDIÇÃO

A função de medição procura exteriorizar no vídeo as principais grandezas de interesse para fins de monitoração. Normalmente, são medidas grandezas tais como:

Bay's de linhas:

corrente de linha; tensões entre fases;
potência ativa; potência reativa.

Bay's de transformadores:

correntes primárias; correntes secundárias;
tensões entre fases do lado secundário;
potências ativas e reativas; energia ativa e reativa para fins de medição de faturamento;
temperatura dos enrolamentos; temperatura do óleo; posição do *tap* do transformador.

Serviços auxiliares CA:

correntes de linha e tensões entre fases do transformador auxiliar; corrente, tensão e frequência do Grupo Gerador Diesel.

Serviços auxiliares CC:

corrente e tensão.

Normalmente essas grandezas são exteriorizadas por meio de tabelas, sendo que as mais importantes são selecionadas para serem indicadas nos diagramas unifilares.

Regra geral, nas medições, são utilizados transdutores para a compatibilização das variáveis elétricas e como foi visto, uma constante de tempo de 100 a 200 m segundos já se traduz numa velocidade de aquisição de dados suficientes para o atendimento aos requisitos de sistema.

Em subestações mais modernas, podem ser utilizados reles digitais. Nesses casos, as informações podem ser transmitidas à Unidade Central de Processamento de preferência via cabo óptico, por serem imunes às interferências eletromagnéticas, ou ainda, como no “Sistema Pirâmide” da empresa Asea Brown Boveri (ABB), através de processamento distribuído, ele pode ser pré-processado ainda no próprio *bay*, através de uma Unidade Remota, cujos resultados de interesse serão encaminhados para a Unidade Central de Processamento.

6) FUNÇÃO DE PROTEÇÃO

Em se tratando de *up-grade* de subestações antigas, é importante sob o aspecto de custos, a manutenção para a maioria das funções, do releamento convencional, prevendo-se a utilização de transdutores para o interfaceamento com os equipamentos digitais.

Normalmente, para a proteção são utilizados módulos dedicados, com processamento local e atuação direta nas bobinas de *trip* dos disjuntores. Esse requisito é muito importante face a necessidade de velocidade de atuação da proteção (treis a cinco ciclos de 60 Hz). Podem também ser utilizados, além dos relês convencionais, relês eletrônicos para a aquisição de dados, como estado de chaves seccionadoras e disjuntores. Quando da utilização de relês eletrônicos, dado as suas características e velocidade de atuação, eles podem ser compartilhados para a proteção e aquisição de dados, em linhas de distribuição, contribuindo para a redução dos custos do sistema. Há a tendência da utilização de um único módulo a ser compartilhado para a proteção e a aquisição de dados, hierarquizando-se a lógica decisória, cujos resultados e dados resultantes são enviados para a Unidade de Aquisição e Controle.

A tabela 3.5 mostra os releamentos usuais com suas principais funções aplicadas a proteção [1].

Tabela 3.5 – Função de relês

FUNÇÃO	APLICAÇÃO
Relês 21P, 67NP, 67NRP	proteção principal de distância e sobrecorrente direcional de terra, os quais são ajustados por zonas de atuação. Esses relês pegam informações de tensão e corrente da Linha de Transmissão associada, calcula a impedância a qual é função da distância do ponto onde ocorreu o curto-circuito (fechamento do arco voltaico), por isso são conhecidos como relês à impedância. Esses relês podem ser utilizados em vários esquemas de teleproteção, tais como transferência direta de disparo, bloqueio, desbloqueio, transferência de disparo por sub ou sobre alcance permissivo etc.
Relês 21S, 67NS, 67NRS:	é a imagem da proteção anterior e existe como proteção de retaguarda para aumentar a segurança do sistema.

FUNÇÃO	APLICAÇÃO
Relê 51 BF:	sobrecorrente para detecção de falha de disjuntor.
Relê 59:	sobretensão.
Relê 27:	subtensão.
Relês 27S e 27P:	relês de detecção de falta de potencial nos relês de proteção primária (P) e secundária (S). No caso de proteção digital, essas unidades são dispensáveis, pois essas funções já são monitoradas pela facilidade de auto-supervisão já incorporadas nessas unidades.
Relê 87:	proteção diferencial para transformadores de três enrolamentos, os quais devem ser associados aos TC's auxiliares. Esse módulo pode ser substituído por similar digital, os quais podem inclusive prescindir de TC's auxiliares.
Relês 50/51, 50/51N:	relês de sobrecorrente de fase e de neutro respectivamente, com função de proteção de retaguarda. Esses módulos podem ser substituídos por dois módulos digitais cada um.
Relê 87B:	proteção diferencial de barra, o qual pode ser substituído por um módulo digital.

As unidades 51BF, 59 e 27 podem ser substituídas por apenas um módulo digital.

7) FUNÇÃO DE MONITORAÇÃO DAS PROTEÇÕES

Para o atendimento a essa função, sendo a proteção convencional, é necessária a monitoração dos contatos dos relês, dimensionando-se essas informações para as unidades de aquisição de dados, com o objetivo do levantamento da “seqüência de eventos” para fins da análise das ocorrências, bem como do conhecimento detalhado da atuação das proteções, uma vez que é necessário a identificação dos detalhes da contingência.

Para o estabelecimento da seqüência de eventos, torna-se imperioso o atendimento ao requisito velocidade de aquisição de dados, os quais devem ter uma ordem de grandeza de 1 mseg.. Esse problema pode ser resolvido com a utilização de proteção digital, uma vez que esses dados podem ser armazenados na própria unidade operada, os quais são transferidos segundo um protocolo de comunicação apropriado, para a Unidade de Aquisição e Controle.

Ainda dentro dessa função, podemos enquadrar a transferência de comandos de um extremo ao outro da Linha de Transmissão, a qual denominamos de Teleproteção e que se caracteriza pela transmissão de um comando na ocorrência completa de uma dada lógica de proteção para que esse sinal, decodificado no outro extremo, possa dar partida a uma lógica de proteção no terminal remoto, que pode consistir desde um *trip* ou comando de abertura de um dado disjuntor até a permissividade ou o bloqueio da possibilidade da abertura desse disjuntor, no estudo da função teleproteção se entra em mais detalhes.

Como já vimos, os relês à impedância, digitais, são capazes de calcular e memorizar a distância do curto-circuito, em relação aos pontos onde ele colhe as informações, porém, os relês à impedância convencionais não são capazes de memorizar essa informação, portanto, nesses casos, é usual ter permanentemente conectado ao sistema, um localizador de defeitos (LDL), o qual poderá ser acionado pela proteção e deverá ser um módulo dedicado a essa função.

A grande maioria dos desligamentos intempestivos de Linhas de Transmissão são de caracter temporário, originadas por descargas de origem atmosféricas diretas ou indiretas, ou ainda de queimadas de roças, normalizando-se após cerca de 250 a 500 m seg. do desligamento da LT, quando da extinção do arco voltaico no ponto de defeito. A função que prevê o religamento da LT após essas ocorrências deve prever um retardo para a inicialização do religamento do disjuntor. Normalmente as normas operativas das empresas concessionárias de energia elétrica prevêm um número de três religamentos automáticos. No caso da persistência do defeito quando dos religamentos e após essas três tentativas, é previsto o bloqueio do fechamento do disjuntor.

Esse religamento pode ser monopolar ou tripolar, uma vez que o defeito pode se dar em uma das fases ou nas três fases. Vale ressaltar que em algumas concessionárias, o religamento, por questões de critérios, é sempre tripolar.

As tentativas de religamento são ajustáveis com uma temporização que pode variar a até 10 segundos para a primeira tentativa e até 60 segundos para as seguintes [1].

Para as interligações de circuitos de diferentes sistemas, a lógica tem que levar em consideração a verificação do sincronismo com vistas ao religamento.

8) FUNÇÃO TELEPROTEÇÃO

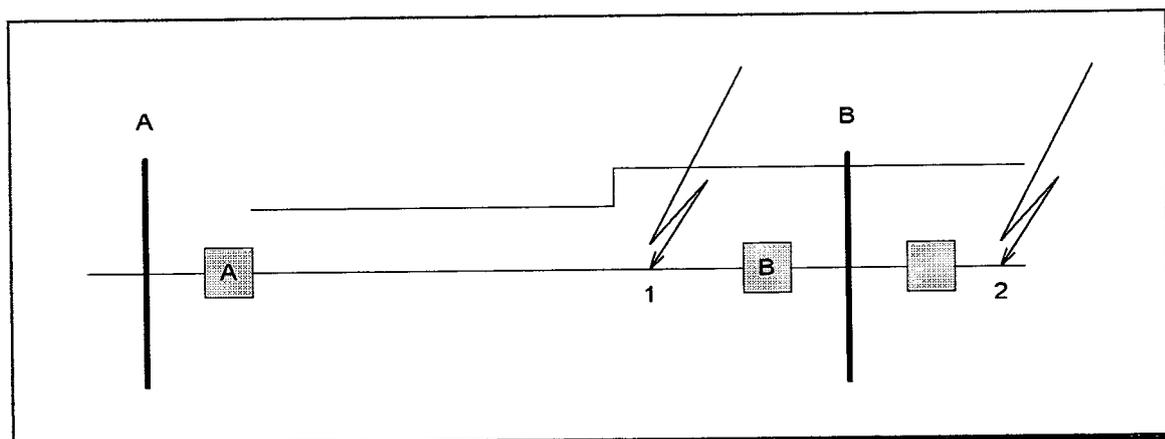
Os requisitos necessários a um sistema de energia elétrica são a sua disponibilidade e a sua qualidade, ou seja, frequência e tensão variando o mínimo possível, assim, para que sejam assegurados esses requisitos e sobretudo a proteção do elemento humano, é necessário que se incrementem facilidades que possibilitem a rápida remoção de trechos de circuitos na presença de defeitos ou funcionamento anômalo. Essas facilidades são providas pelos circuitos de proteção.

Um dos mais importantes objetivos dos circuitos de proteção é a rapidez na eliminação de defeitos dentro do circuito a ser protegido, para que o mesmo seja rapidamente isolado, de forma que as instalações não fiquem expostas a correntes de falhas por um tempo superior a sua capacidade de assimilá-las, e também a que se minimizem as possibilidades de repercussão do distúrbio no restante do sistema [10].

Assim, o circuito de proteção associado ao sistema a proteger deve ser rápido e seletivo.

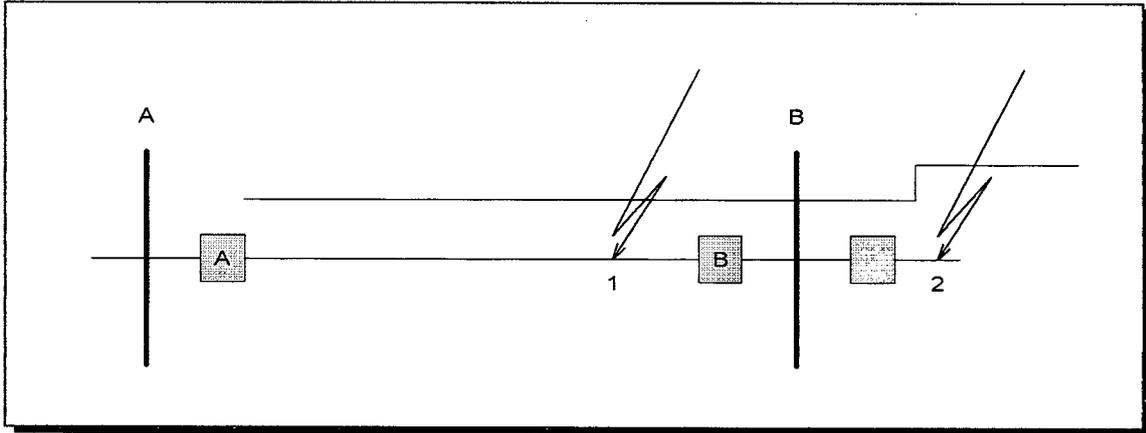
Em um esquema de proteção de Linha de Transmissão, se quisermos ser seletivos, certamente perderemos em rapidez para defeitos ocorridos próximos aos terminais e se quisermos uma atuação rápida, certamente perderemos em seletividade. Para um melhor entendimento vejamos as figuras abaixo:

Figura 3.20 – Teleproteção, ajustes das proteções



No esquema da figura anterior, para sermos seletivos, a proteção de A seria ajustada para alcançar em torno de 90% da linha, neste caso, para defeito em 1, o mesmo somente será eliminado após um tempo razoavelmente longo, perdendo-se portanto em rapidez.

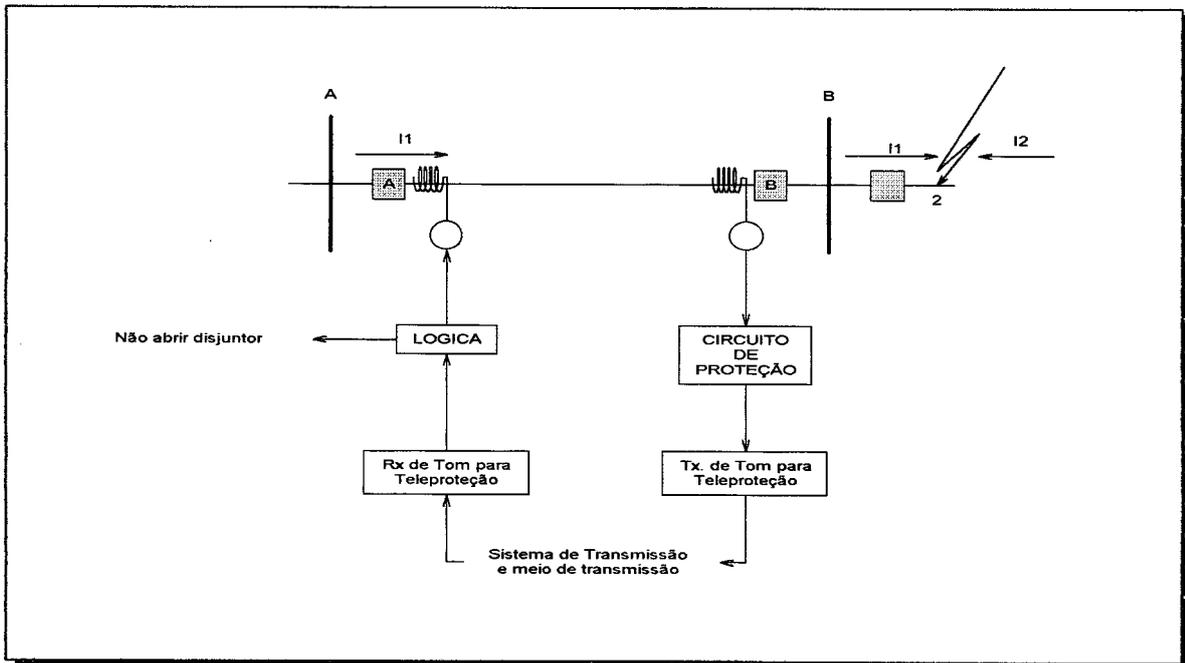
Figura 3.21 – Teleproteção, ajustes das proteções



No esquema da figura acima, para sermos rápidos, a proteção de A seria ajustada para alcançar depois de B, assim, em caso de defeito em 2, haveria a abertura desnecessária de A, perdendo-se em seletividade.

A teleproteção é a solução inteligente que visa aliar a rapidez de atuação de uma proteção à seletividade requerida. É um sistema de proteção onde um dado terminal é informado pelo terminal remoto da existência de defeito na zona de interesse, utilizando-se de sistema de transmissão via ondas portadoras (*carrier*), rádio ou fibra óptica. A rapidez de atuação, aliada a seletividade é conseguida porque o terminal remoto, possuindo sensores adequados para “sentirem” a direção do fluxo de corrente de defeito, fornece quase que instantaneamente esta informação ao outro terminal.

Figura 3.22 – Teleproteção, esquema básico



O método mais comumente usado para a transmissão do sinal de teleproteção consiste de se utilizar a própria Linha de Alta Tensão como meio de propagação. Nesse método, os transmissores e receptores são acoplados à linha através dos equipamentos de sintonização e capacitores de acoplamento. As bobinas de bloqueio são sintonizadas na frequência do sinal de RF dos transceptores OPLAT's e localizados nos terminais da linha a ser protegida, possuindo uma baixa impedância para a frequência industrial e alta impedância para a frequência de rádio, a qual tem por finalidade confinar os sinais de RF no interior da Linha de Transmissão, conforme figura 7.13 acima.

Deve-se observar que como o sinal é propagado na própria LT, não é possível ter-se certeza que haverá transmissão de sinal dentro dos níveis desejáveis quando da ocorrência de defeitos internos à Linha a ser protegida. Para a minimização do problema acima, desenvolveu-se a lógica de reforço, a qual, na presença de um comando para o chaveamento do tom de teleproteção, prioriza o envio da frequência de comando, em detrimento das demais informações superpostas ao canal de comunicações.

Outro aspecto importante referente ao envio de tons de áudio para teleproteção, e que no meio OPLAT assume características particulares, é o tempo de transmissão do sinal, que por definição, é o tempo que o sinal levará para percorrer os circuitos do equipamento de tom e terminal OPLAT, trajeto de ida e volta, com ligação *back to back*. Esse tempo é comumente ajustável no equipamento de tom, a partir da atuação na constante de tempo RC de um circuito integrador.

Embora como já foi visto, para a eficiência da proteção esse tempo deva ser o menor possível, deve-se manter um compromisso entre o maior tempo de transmissão que possa ser absorvido pelo esquema de proteção utilizado e que possa manter a segurança do reconhecimento de um ruído espúrio na frequência de comando, como um comando real. Segue abaixo os tempos de transmissão mais comuns por esquema de proteção:

Tabela 3.6 – Tempo de transmissão dos principais esquemas de Teleproteção

ESQUEMA DE TELEPROTEÇÃO	TEMPO DE TRANSMISSÃO
DTT e DUTT	16 m seg.
PUTT	12 m seg.
Blocking e Unblockig	10 m seg.

Quando os equipamentos de tom de áudio estão associados a sistemas de transmissão óptico-digital, esses tempos podem sofrer reduções substanciais, uma vez que esses meios são mais imunes aos ruídos externos e os pulsos são regenerados [10].

9) FUNÇÃO TELECONTROLE E SINALIZAÇÃO

Os telecomandos são informações que objetivam a efetivação de ações tais como a abertura e o fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras enquanto que as sinalizações objetivam a monitoração do estado de equipamentos, como disjuntor aberto, fechado etc..

Os telecomandos podem ser originados na UAC, na sala de comando da subestação ou ainda nos Centros de Controle, como COR, COS etc..

Em uma subestação, podemos encontrar os seguintes comandos: operação dos disjuntores; operação de chaves seccionadoras; seleção de controle automático/manual; seleção de localização local/remoto; bloqueio de operação de disjuntor; desbloqueio de operação de disjuntor; bloqueio/desbloqueio de relê; acionamento de comutador sob-carga; seleção de sincronização; transferência de proteção etc..

Embora os comandos possam ser originados simultaneamente de locais distintos, o esquema lógico a ser cumprido deve ser tal que somente permita a permissividade do comando em acordo com a seleção hierárquica requerida.

Junto aos equipamentos há uma chave com as posições local/remota. A posição “local” define que o comando deve ser iniciado no console de comando local, cujo acionamento poderá ser mecânico ou elétrico.

Na Unidade de Aquisição e Controle deve haver uma chave com as posições local/remoto. A posição “local” define que o comando deve ser iniciado no console da UAC e “remotamente” na sala de comando da subestação.

Na sala de comando da subestação, pode também haver uma chave com essas posições, sendo que na posição “remota”, o comando deve ser iniciado no Centro de Operação Regional (ou COS).

Na presença de um comando, o mesmo é transferido de sua origem via comunicação de dados, até a UAC, a qual, a partir de uma saída digital e um circuito de *drive* aciona um relê auxiliar, cujos contatos são parte integrante do circuito de operação do equipamento.

Aliada a função de comando dos equipamentos, temos a função intertravamento, o qual será descrito em mais detalhes no capítulo 7.1.4. A função intertravamento tem como finalidade maior, inibir os comandos, caso não sejam satisfeitas certas condições necessárias à segurança do sistema.

Uma outra função que não pode ser esquecida, pela sua importância, é a verificação da veracidade da saída digital de comando. Existem alguns procedimentos com vistas a contornar esse problema, alguns dos quais, inerentes à realidade local. Um deles se constitui na redundância do caminho do

signal de comando, de forma a termos uma lógica *AND* satisfeita entre esses sinais, para a sua exteriorização.

Outro aspecto importante a ser considerado é quanto a função de falha de disjuntor [1]. Após o envio de comando de abertura de um disjuntor pela atuação da proteção, é possível que, por falha mecânica, não haja a interrupção da corrente. Nesse caso, há a atuação do relê 51BF, o qual é temporizado. Na atuação do relê 51BF, é dada partida a uma lógica a qual deverá atuar em todos os disjuntores associados a barra em que o equipamento com defeito está conectado, com o objetivo de isolá-lo.

Em um sistema digitalizado, é comumente implementada uma função computacional criando uma matriz com as informações do estado dos equipamentos, a qual é rodada todas as vezes que os mesmos são acionados, para fins de atualização.

Com a automatização das subestações, é possível a criação de rotinas de manobras automatizadas, seja no sistema auxiliar da subestação como também nas manobras de equipamentos de pátio, economizando-se em tempo de operação e sobretudo minimizando-se as possibilidades de erros de manobra.

10) FUNÇÃO FLUXO DE REATIVO E CONTROLE LOCAL DE TENSÃO

Essa função, atuando nos *taps* dos transformadores que possuem comutador sob carga, bem como conectando e desconectando cargas reativas, tem como objetivo maior o controle da tensão nos barramentos principais da subestação.

A partir de sistemas de automação digitalizados, podem ser programadas facilidades tais como a correção de banco de capacitores a partir de um determinado valor de referência do fator de potência ou ainda a movimentação de *taps* de transformadores para a regulação da tensão no secundário de um transformador.

11) FUNÇÃO DE SINCRONISMO

Quando se conectam fontes distintas, é necessário que no momento da conexão, os módulos das tensões, o ângulo de fase e as frequências dos sinais envolvidos estejam o mais próximo possível, ou seja, é necessário que esses sinais estejam em sincronismo. Isso é possível a partir da monitoração dessas grandezas nos dois pólos do disjuntor.

Em sistemas digitalizados, são comumente incluídos relês de sincronismo para a realização dessa tarefa. Assim, pensando em termos de automatismo, o sistema digital pode receber a permissividade para mandar fechar o disjuntor de formas a fazê-lo sincronizado.

12) FUNÇÃO ALARMES

Essa função tem por finalidade a exteriorização de *status* de equipamentos e de grandezas, os quais devem ser comparadas com valores de referência, para as condições de contorno estabelecidas e sinalizará de formas a chamar a atenção do operador ou ainda, poderá inicializar uma dada lógica, em caso de violação desses limites. Esses dados devem ser armazenados cronologicamente e podem ser agrupados das mais variadas formas, tais como:

- relação de alarmes em ordem cronológica.
- relação de alarmes correntes.
- relação de alarmes por importância.
- relação de alarmes por localização na Subestação.

É muito importante que esses alarmes conttenham como informação adicional o instante de sua ocorrência, como também devem se fazer valer de recursos de animação em vídeo e sons de formas a chamar a atenção para o evento em pauta.

Nessa função, devem constar os seguintes grupos de alarmes:

- defeito ou chaveamento do transceptor de tom para teleproteção.
- defeito nos disjuntores.
- anomalia nos serviços auxiliares CC e CA.
- sobrecarga nos transformadores e alimentadores.
- tensão, corrente, frequência, temperatura, pressão etc, fora dos limites.
- interrupção de seqüência automática em condições específicas.
- defeitos em relês.
- falha no equipamento *CARRIER*.

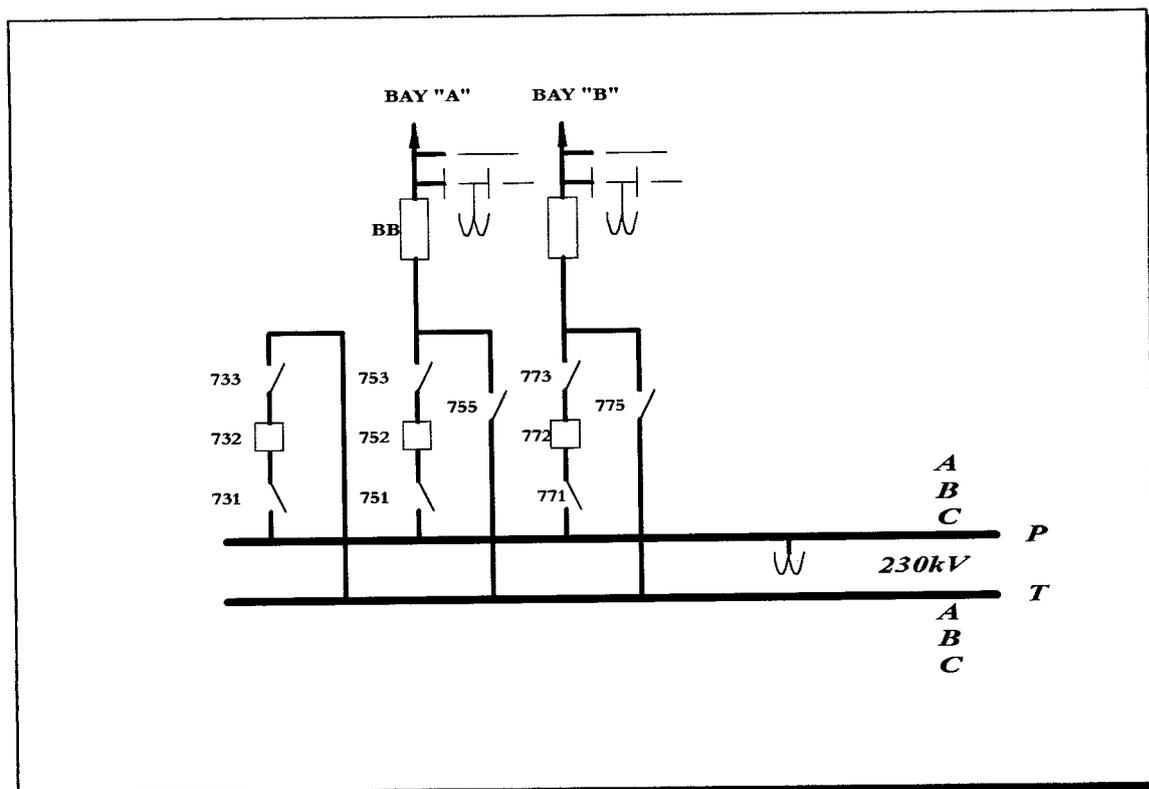
É importante a implementação nesse módulo de recurso que possibilite a exteriorização do reconhecimento desses alarmes.

3.4.1.3. LAY OUT DA SUBESTAÇÃO

Como o objetivo não é implementar um caso real, e sim mostrar a viabilidade da aplicação de técnicas de IA para a implementação de Sistemas Especialistas nessa área, o protótipo se restringirá a exemplificação de facilidades de interesse imediato.

A figura 3.25 mostra o *layout* da subestação de 230 kV, onde estão representados os equipamentos responsáveis pelas manobras e leitura das principais grandezas.

Figura 3.23 – Lay-out da Subestação



A seguir segue o quadro demonstrativo da composição dos módulos.

Tabela 3.7 – Quadro demonstrativo de composição de módulos

MODULO	EQUIPAMENTO	QTDE	Nº OPER.	FABRICANTE	MODELO	
Transferência (73)	Disjuntor	01	732	MERLIN GERIN	PA2-2435-40	
	Seccionadora	02	731/733	Spig	A1005-MEC.GM2	
LTI (75)	Disjuntor	01	752	Merlin Gerim	FA20245-40	
	Seccionadora	02	751/753	Spig	A1005-MEC.GM2	
	Seccionadora	01	745	IAFA	S3P23020-MEC.SE-2A	
	TC	03	-	Brown Boveri	ADT-245	
LTII (77)	Disjuntor	01	772	Merlim Gerim	FA2-245-40	
	Seccionadora	02	771/773	Spig	A100ST-MEC.GM2	
	Seccionadora	01	775	IAFA	SSP23020-MEC.SE-2A	
	TC	03	-	Brown Boveri	AOT-245	
	Bob. Bloqueio		01	-	Brown Boveri	1,0mH-44-73Hz
			01	-	Haefely-Er	
	TPC		03	-	Trench	ATEHM 230
	Pára-raios		03	-	Ohio Brass	MPR 228
Barra Principal	TP	03	-	Balteou	UEZ 220	

3.4.1.4. A FUNÇÃO INTERTRAVAMENTO

Para a implementação dos recursos que visam o apoio a decisão para a operação de uma subestação, quanto ao seu aspecto de intertravamento, é necessário a implementação dos comandos e suas exteriorizações em tela.

Para a implementação dos comandos, foi considerado a operação dos equipamentos como chaves seccionadoras e disjuntores, no campo e remotamente na Casa de Controle, pela ação do operador via Sistema Especialista.

Este trabalho não contempla a atuação de comandos pela ação dos circuitos de proteção, uma vez que os mesmos são acionados diretamente pelos sensores associados, com vistas a redução do tempo de resposta.

Os comandos a serem considerados são:

Comando elétrico local para abertura e fechamento.

Nesse caso, é necessário a comutação via Sistema Especialista para a condição de comando local. O *slot* que exterioriza o *status* do equipamento é mantido atualizado, o qual é utilizado nas lógicas

subsequentes.

Comando elétrico via Sistema Especialista. Todos os comandos, bem como o intertravamento associado, são simulados pelo sistema, de formas que, nos casos que os pré-requisitos não são atendidos, o comando é inibido, e o sistema volta para o estado anterior. Esse procedimento promove no mínimo, uma redundância, refletindo em segurança para o sistema. Em casos de sistemas de automação de pouca importância, a simulação por *software* também se reflete em custo, uma vez que, a partir da monitoração dos *status* dos componentes do sistema e das grandezas de interesse, são rodadas as funções lógicas, dispensando-se a interconexão física com os reamentos no campo.

No trabalho não foi levado em consideração o comando de abertura em emergência, pelos motivos expostos anteriormente.

Nos próximos parágrafos são dadas as tabelas de operação dos disjuntores e os diagramas lógicos correspondentes, com respectivos comentários.

3.4.2. OPERAÇÃO DOS DISJUNTORES

3.4.2.1. DISJUNTOR 732

A tabela 3.8 mostra as condições de contorno para a operação do disjuntor DJ 732

Tabela 3.8 – Tabela de operação do disjuntor 732

TABELA DE OPERAÇÃO DO DISJUNTOR 732								
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Fechamento		Abertura	
					Local	Remoto	1	2
I N T	731	Seccionadoras isoladoras do DJ. 732	Pátio	Aberta.	X			
	733		Pátio	Aberta	X			
ALTERNATIVA 1 - FECHAMENTO REMOTO								
E R T R A V A M	751	Seccionadoras isoladoras do DJ 752	Pátio	Aberta		X		
	753		Pátio	Aberta		X		
	752-43T ou 752-43T	Chave de transf. proteção, bay 75	PC-18	Transf.		X		
	752-43T	Chave de transf. proteção, bay 75	PC-18	Interm.		X		
	752SS	Chave de sincronismo	PC-18	Ligada		X		
ALTERNATIVA 2 - FECHAMENTO REMOTO								
E N T O	771	Seccionadoras isoladoras do DJ 772	Pátio	Aberta		X		
	773		Pátio	Aberta		X		
	772-43T ou 772-43T	Chave de transf. proteção, bay 77	PC-20	Transf.		X		
	772-43T	Chave de transf. proteção, bay 77	PC-20	Interm.		X		
	772SS	Chave de sincronismo	PC-20	Ligada		X		

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- a) Posicionar a chave LRS, seletora “Local-remoto” em “Local”.
- b) ABERTURA: pressionar a botoeira BPS (abertura) para abrir.
- c) FECHAMENTO: pressionar a botoeira BPE para fechar.

Remotamente (no caso real - convencional)

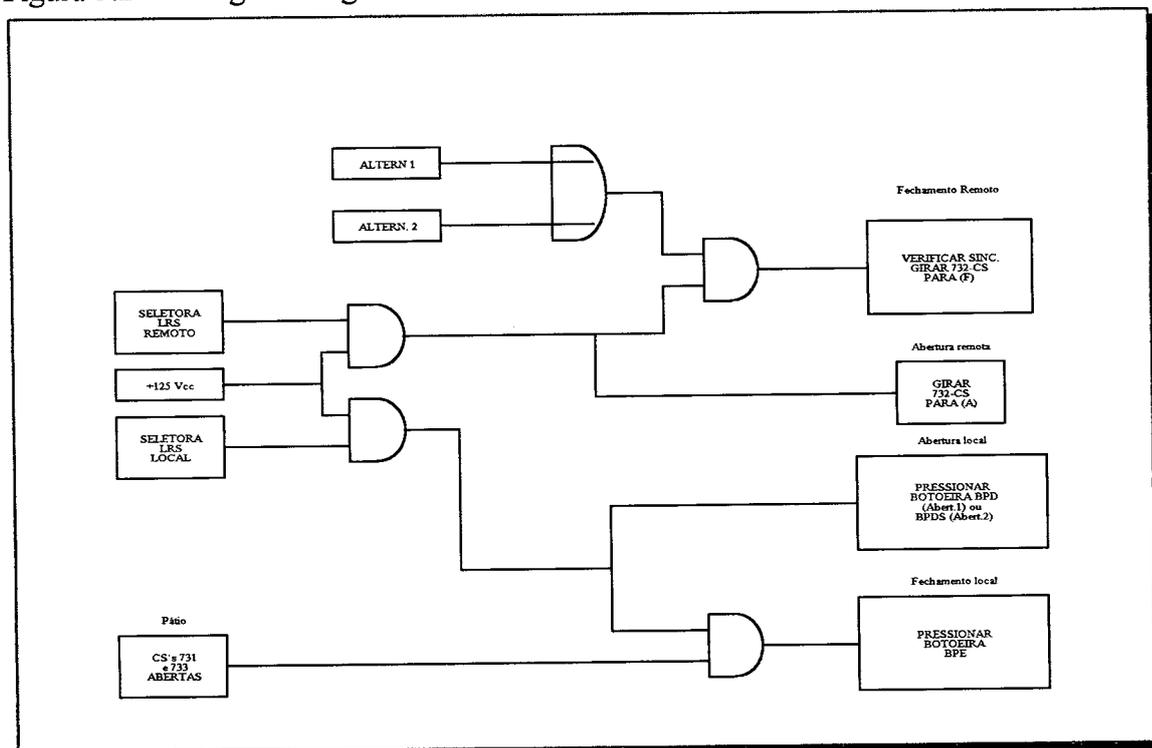
- a) Posicionar a chave LRS, seletora “Local-Remoto” em “Remoto”;
- b) ABERTURA: girar a chave 732CS do painel de comando PC-15 para “A”, para abrir.
- c) FECHAMENTO: verificar sincronismo e girar a chave 732CS do painel de comando PC-20, para “F”, para fechar.

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.24 – Diagrama lógico DJ-732

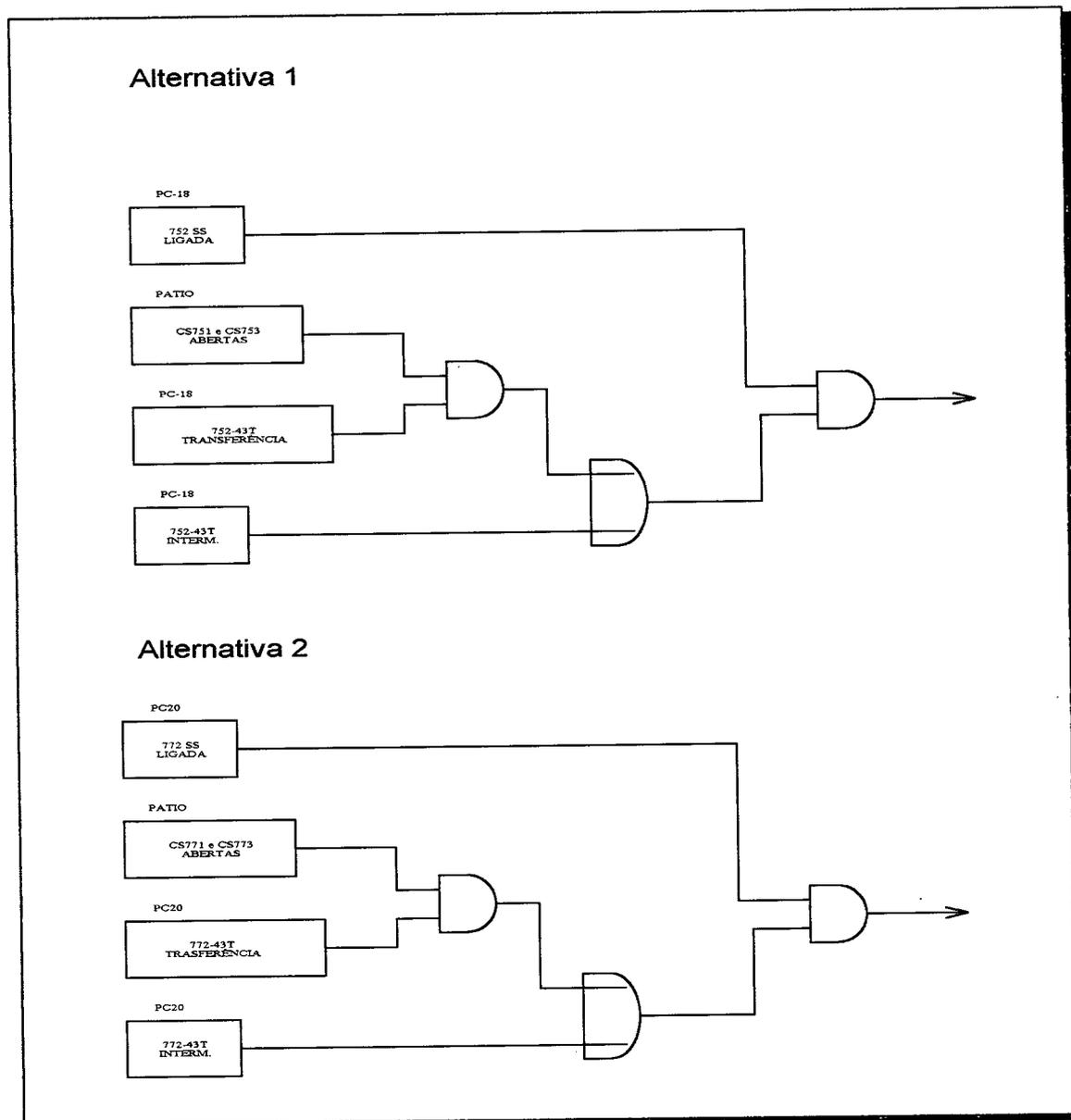


Conforme pode ser visto no diagrama lógico, o comando de fechamento “local” do disjuntor 732 somente deve ser possível com as chaves seccionadoras 731 e 733 abertas, dependendo ainda da existência de alimentação em +125Vcc nos níveis adequados, e a chave seletora “local/remota” seletada para a posição “remota”.

Quanto a abertura do disjuntor 732, seja local ou remota, somente haverá a dependência das duas últimas variáveis mencionadas, ou seja, chave seletora seletada para a posição local e alimentação em +125 Vcc nos níveis adequados.

Para o fechamento remoto, será necessária além das variáveis citadas acima, a geração da permissividade traduzida pelas alternativas 1 e 2, conforme diagrama lógico a seguir.

Figura 3.25 – Diagrama lógico DJ-732



Para as alternativas 1 e 2, é necessária que a chave 752SS esteja ligada, ou seja, há a necessidade de que haja um *bay* selecionado para a chave de sincronismo. A chave de sincronismo é normalmente associada a um relê ou dispositivo de sincronismo, o qual tem como função, comparar a amplitude, a frequência e o ângulo de fase das tensões na barra da subestação e na entrada do *bay* que se deseja sincronizar. O relê ou dispositivo de sincronismo opera quando da existência de sincronismo.

Outro aspecto comum as alternativas 1 e 2 é quanto a chave de transferência. Para o fechamento remoto do disjuntor 732, é necessário que o *bay* de interesse seja transferido. O disjuntor 732 pertence ao *bay* de transferência, o qual poderá ser utilizado com vistas a isolação tanto do disjuntor 752 quanto do disjuntor 772, portanto, é necessário definir para o sistema qual o *bay* que deverá ser efetivamente isolado.

A chave de transferência 43T pode ser setada em três posições, quais seja, Normal (N), Transferência (T) e Intermitente (I). A posição Intermitente somente se dará no momento em que se dá a transferência, instante em que a proteção associada ao disjuntor a ser isolado deverá atuar simultaneamente nele e no disjuntor do *bay* de transferência.

Estando a chave de transferência na posição transferida para um determinado *bay*, é condição necessária para a permissividade do fechamento remoto do disjuntor do *bay* de transferência, que as chaves seccionadoras isoladoras do disjuntor a ser isolado estejam abertas.

3.4.2.2. DISJUNTOR 752

A tabela 3.9 mostra as condições de contorno para a operação do disjuntor DJ 752

Tabela 3.9 – Tabela de operação do disjuntor 752

TABELA DE OPERAÇÃO DO DISJUNTOR 752								
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Fechamento		Abertura	
					Local	Remoto	1	2
I N T	751	Seccionadoras isoladoras do DJ. 752	Pátio	Aberta.	X			
	753		Pátio	Aberta	X			
E R T	751	Seccionadoras isoladoras do DJ 752	Pátio	Aberta		X		
	753		Pátio	Aberta		X		
R A V A	752-43T ou 752-43T	Chave de transf. proteção, bay 75	PC-18	Transf.		X		
	752-43T	Chave de transf. proteção, bay 75	PC-18	Interm.		X		
M .	752SS	Chave de sincronismo	PC-18	Ligada		X		

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

a) Posicionar a chave LRS, seletor “Local-Remoto” em “Local”;

b) ABERTURA: pressionar a botoeira CS/T;

c) FECHAMENTO: pressionar a botoeira CS/C.

Remotamente (no caso real - convencional)

a) Posicionar a chave LRS, seletora “Local-Remoto” em “Remoto”;

b) ABERTURA: girar a chave 752 CS do painel de comando PC 18 para “A” para abrir;

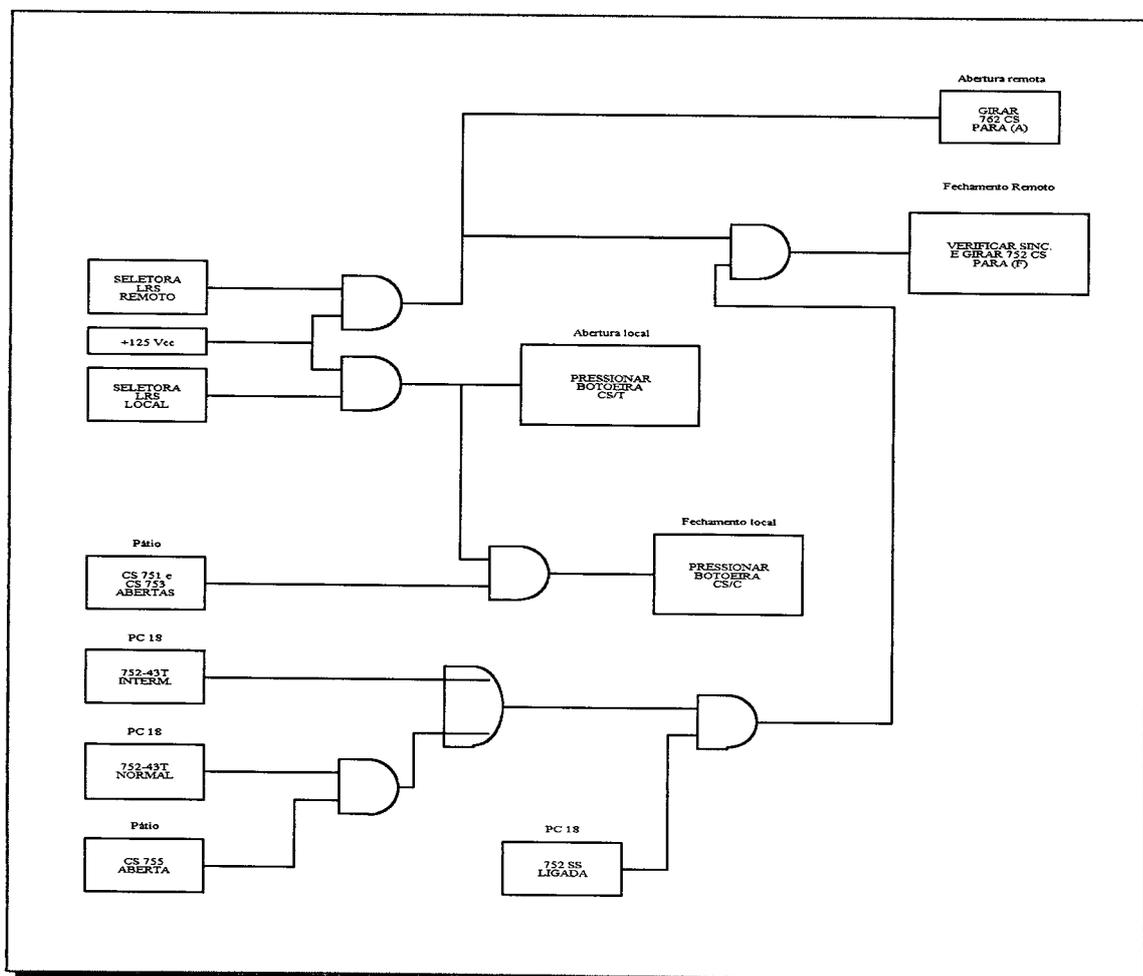
c) FECHAMENTO: verificar sincronismo e girar a chave 752 CS para “F”, para fechar.

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.26 – Diagrama lógico DJ - 752



Para a abertura local do disjuntor 752 é suficiente que a chave seletora LRS esteja na posição “Local”, e que a alimentação +125 Vcc esteja dentro dos parâmetros exigidos pelo sistema, no entanto, para o fechamento local, acrescidas das exigências anteriores, some-se a condição de que as chaves seccionadoras isoladoras 751 e 753 estejam na posição abertas.

Para a abertura remota, a condição requerida é que a chave seletora LRS esteja posicionada para “Remota” e a alimentação +125Vcc esteja dentro dos parâmetros exigidos pelo sistema

Para o fechamento remoto do disjuntor 752, além das exigências mencionadas no parágrafo anterior, é condição dimensionante que a chave de seleção do *bay* para sincronismo esteja ligada e selecionada para o *bay* em curso e seja verificada uma das duas condições:

a) chave de transferência 43T deve estar na posição de intermitente, possibilitando, conforme já dito anteriormente, a atuação da proteção simultaneamente no disjuntor do *bay* de transferência e no disjuntor 752

b) chave de transferência 43T na posição normal e a chave seccionadora 755 (seccionadora de *by-pass*) aberta.

Reunidas as condições acima descritas, o disjuntor 752 deverá ser fechado quando for verificado o sincronismo conforme descrito em capítulos anteriores.

3.4.2.3. DISJUNTOR 772

A tabela 3.10 mostra as condições de contorno para a operação do disjuntor DJ 772

Tabela 3.10 – Tabela de operação do disjuntor 772

TABELA DE OPERAÇÃO DO DISJUNTOR 772								
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Fechamento		Abertura	
					Local	Remoto	1	2
I N T E R T R A V A M	771 773	Seccionadoras isoladoras do DJ. 772	Pátio Pátio	Aberta. Aberta	X X			
	775 772-43T ou	CS by-pass bay 77 Chave transf. proteção	Pátio PC-20	Aberta Normal		X X		
	772-43T	Chave de transf. proteção.	PC-20	Interm.		X		
	772SS	Chave de sincronismo	PC-20	Ligada		X		

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- a) Posicionar a chave LRS, seletora “Local-Remota” em “Local”;
 - b) ABERTURA: pressionar a botoeira BPD (abertura 1) ou BPDS (abertura 2) para abrir;
 - c) FECHAMENTO: pressionar a botoeira BPE para fechar.
- Remotamente (no caso real - convencional)

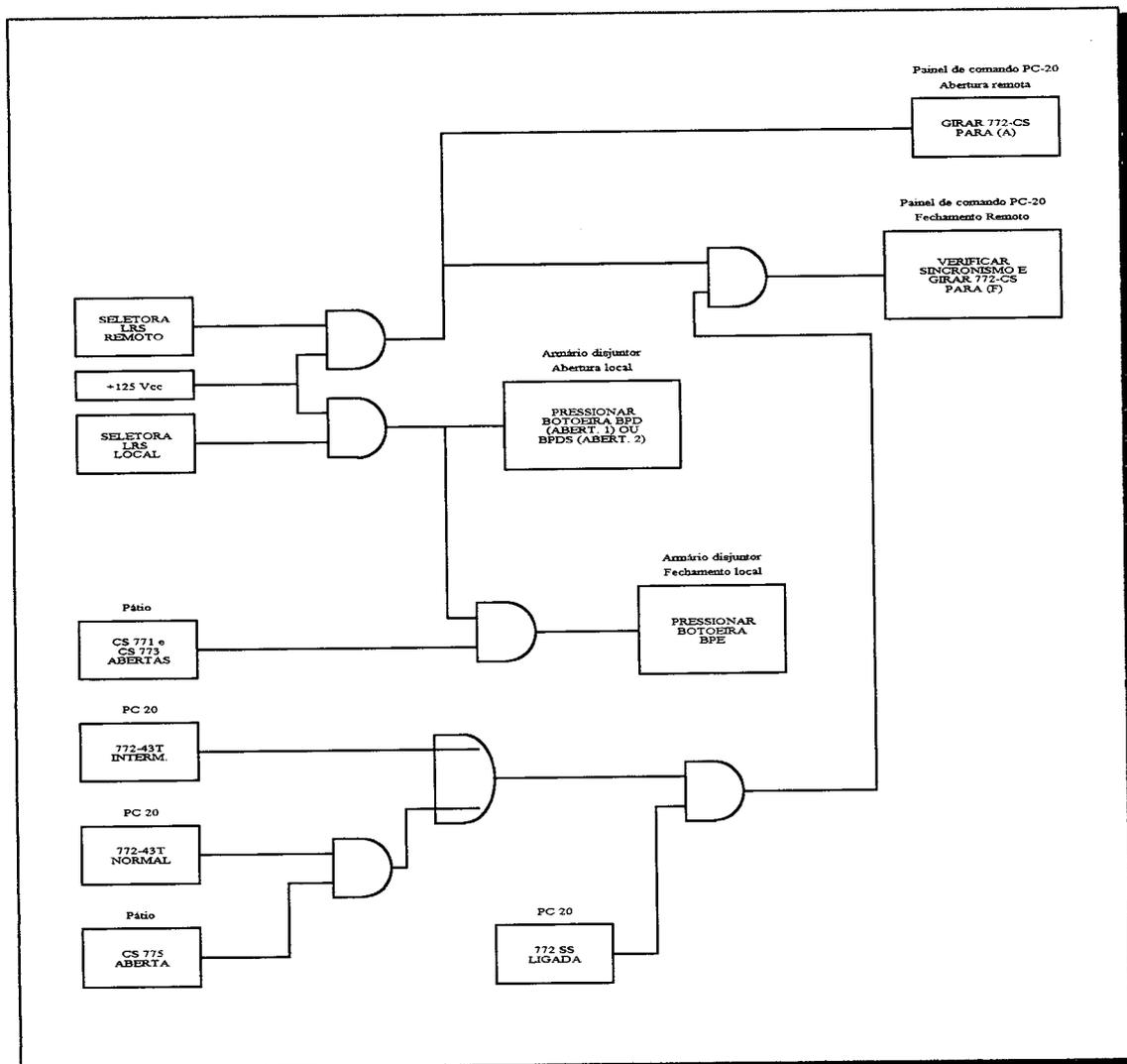
- a) Posicionar a chave LRS, seletora “Local-Remoto” em “Remoto”;
- b) ABERTURA: girar a chave 772 CS do painel de comando PC 20 para “A” para abrir;
- c) FECHAMENTO: verificar sincronismo e girar a chave 772 CS do painel de comando PC 20 para “F”, para fechar.

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.27 – Diagrama lógico DJ - 772



Considerando-se a simetria, todas as observações feitas para o disjuntor 752 poderão ser estendidas para o disjuntor 772, substituindo-se os números operacionais dos equipamentos envolvidos.

3.4.3. OPERAÇÃO DAS CHAVES SECCIONADORAS

3.4.3.1. CHAVES SECCIONADORAS 731 E 733

A tabela 3.11 mostra as condições de contorno para a operação das Chaves Seccionadoras 731 e 733.

Tabela 3.11 – Tabela de operação das chaves seccionadoras 731 e 733

TABELA DE OPERAÇÃO DAS CHAVES SECCIONADORAS 731 E 733						
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Comando	
					Mec.	Elétrico
I N T E R T R A V A M E N T O	732	Disjuntor do bay	Pátio	Aberto	X	X

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- comando mecânico:

a) Posicionar a chave BC, seletora "Local-Manual-Remota" em "Manual".

b) Introduzir a manivela, deslocando inicialmente para a esquerda a tampa de proteção do encaixe da mesma, bloqueando desta forma o comando elétrico da CS através da chave limite BC1. Girar a manivela no sentido desejado para abrir ou fechar. Retirar a manivela após a operação.

- comando elétrico.

a) Local:

- Posicionar a chave BC, seletora "Local-Manual-Remoto" em "Local";

- Girar a chave de comando CAL-CFL para "A" ou "F" para abrir ou fechar respectivamente.

b) Remoto:

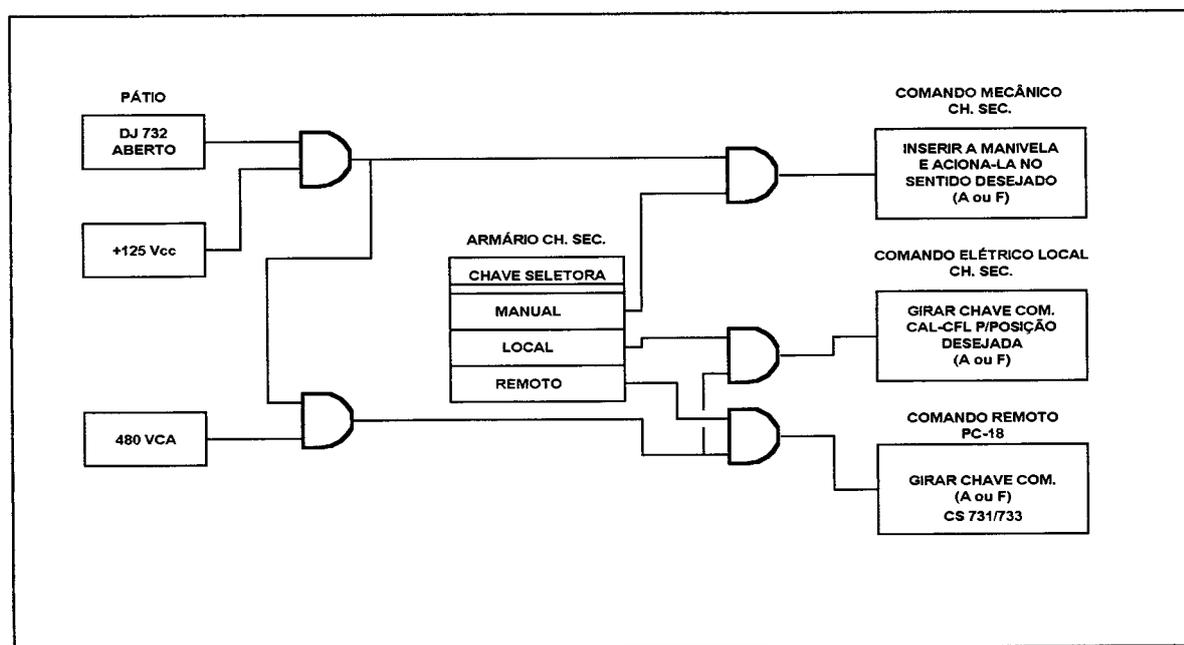
- Posicionar as chaves BC, seletoras "Local-Manual-Remoto" das CS's 731 e 733 em "Remoto";
- Girar a chave de comando 731/733-CS no painel de comando do bay 73 (PC-15) para a posição "A" ou "F" para abrir ou fechar, respectivamente (operação simultânea das CS's 731 e 733);

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.28 – Diagrama lógico CS – 731 e CS - 733



Para o acionamento mecânico das chaves seccionadoras 731 e 733, a chave seletora, localizada no pátio da subestação, deverá estar posicionada para "Manual" e tanto a alimentação em +125 Vcc deverá estar normal quanto o disjuntor 752 deverá estar na posição "aberto". É importante nesse caso a presença da alimentação em 125 Vcc, uma vez que essa tensão alimenta todo o releamento que proverá as informações necessárias ao sistema. Nas classes de tensões superiores a 69 kV, as chaves seccionadoras normalmente não são concebidas para operarem com carga.

Para o comando elétrico local, a chave seletora deverá estar posicionada em “Local”, e as alimentações em 480 VAC e +125 Vcc devem estar com seus valores dentro dos parâmetros exigidos pelo sistema, como também o disjuntor 752 deve estar na posição “aberto”.

Para o comando remoto, todas as observações do parágrafo anterior são válidas, a menos da chave seletora que deverá estar na posição “Remota”.

3.4.3.2. CHAVES SECCIONADORAS 751 E 753

A tabela 3.12 mostra as condições de contorno para a operação das chaves seccionadoras 751 e 753.

Tabela 3.12 – Tabela de operação das chaves seccionadoras 751 e 753

TABELA DE OPERAÇÃO DAS CHAVES SECCIONADORAS 751 E 753						
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Comando	
					Mec.	Elétrico
I N T E R T R A V A M E N T O	752	Disjuntor do bay	Pátio	Aberto	X	X

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- comando mecânico.

- a) Posicionar a chave BC, seletora “Local-Manual-Remota” em “Manual”;
- b) Introduzir a manivela deslocando inicialmente para a esquerda a tampa de proteção do encaixe da mesma, bloqueando desta forma o comando elétrico da CS através da chave limite BC1. Girar a manivela no sentido desejado para abrir ou fechar. Retirar a manivela após a operação.

- comando elétrico (método convencional).

a) Local:

- Posicionar a chave BC, seletora "Local-Manual-Remota" em "Local";

- Girar a chave CAL/CFL para "A" ou "F" para abrir ou fechar respectivamente;

b) Remoto:

- Posicionar as chaves BC, seletora "Local-Manual-Remoto" das CS's 751 e 753 em "Remoto";

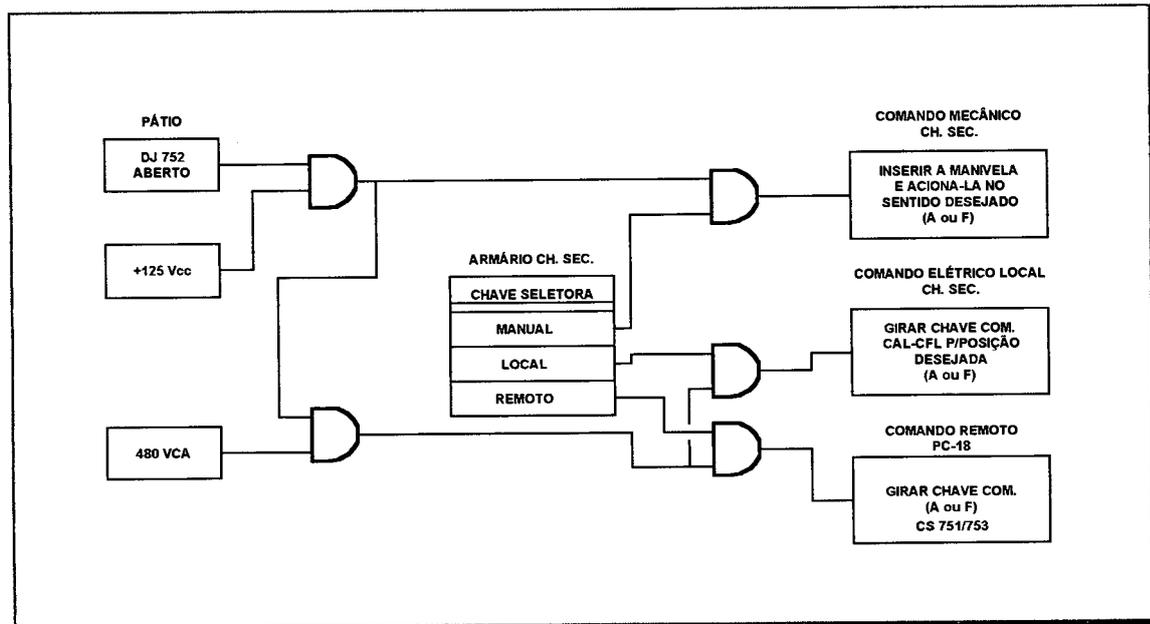
- Girar a chave 751/753-CS, no painel de comando do bay 75 (PC-18), para a posição "A" ou "F" para abrir ou fechar respectivamente (operação simultânea das CS's 751 e 753);

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.29 – Diagrama lógico CS – 751 e CS - 753



Conforme diagrama lógico acima, para o fechamento mecânico das chaves seccionadoras 751 e 753, é necessário que a alimentação em +125 Vcc esteja normal, o disjuntor 752 esteja na posição “Aberto” e a chave seletora na posição “Normal”.

Para os comandos elétricos local e remoto, além dos pré-requisitos anteriores, é necessário que a alimentação em 480 VCA esteja nos limites requeridos pelo sistema e adicionalmente, que a chave seletora esteja na posição “Local” ou “Remoto” respectivamente.

3.4.3.3. CHAVE SECCIONADORA 755

A tabela 3.13 mostra as condições de contorno para a operação da chave seccionadora 755.

Tabela 3.13 – Tabela de operação da chave seccionadora 755

TABELA DE OPERAÇÃO DA CHAVE SECCIONADORA 755						
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Comando	
					Mec.	Elétrico
I N T E R T R A V A M E N T O	752-43T	Chave transferência proteção	PC-18	Interm.	X	X
	89-2/X	Outras CS's de By-pass (775) abertas	PC-15	Operado	X	X
	73/Z ou	Vão transf. aberto (Dj. 732 aberto e/ou CS 731 aberta e/ou CS 733 aberta)	PC-15	Operado	X	X
	73/X1	Vão transf. fechado (Dj. 732 e CS's 731 e 733 fechadas)	PC-15	Operado	X	X
	752	Dj. do módulo 75	Pátio	Operado	X	X
	751	CS isoladora Dj. 752	Pátio	Operado	X	X
	753	CS isoladora Dj. 752	Pátio	Operado	X	X

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- Comando mecânico:

a) Posicionar a chave CS/I, R, seletora de comando “Local-O-Remoto” em “O” (desligado);

b) Acionar a alavanca IM para a posição "Manual" e segurando nesta posição, inserir a manivela em seu encaixe próprio, bloqueando o circuito de força do motor. Guiar a manivela no sentido desejado para abrir ou fechar a CS, e retirar a manivela após a operação.

- Comando elétrico (método convencional).

a) Local:

- Posicionar a chave CS/L, R, seletora "Local-O-Remoto" em "Local";

- Guiar a chave de comando BA/BF, para "A" ou "F" para abrir ou fechar respectivamente;

b) Remoto:

- Posicionar as chaves CS/R, L, seletora "Local-O-Remoto" em "Remoto";

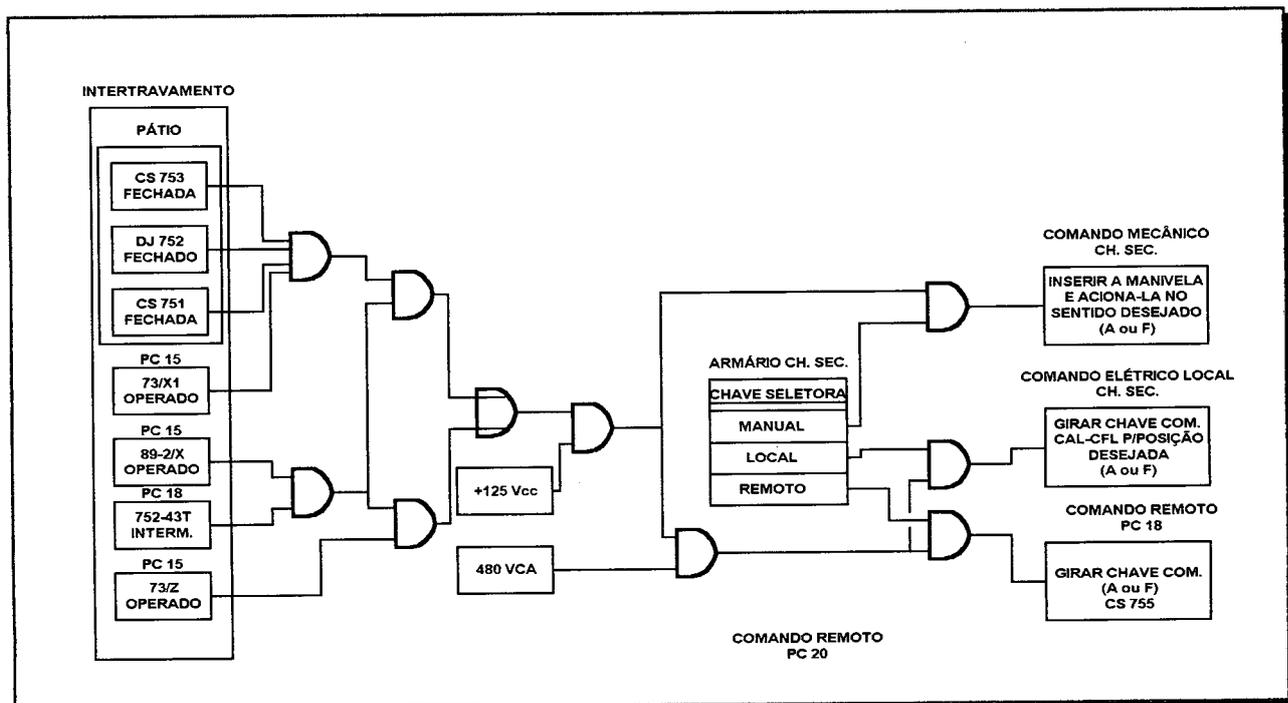
- Girar a chave 755-CS, no painel de comando PC-18, para a posição "A" ou "F" para abrir ou fechar, respectivamente.

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.30 – Diagrama lógico CS - 755



A chave seccionadora 755 é uma chave de *by-pass*, e tem a finalidade de permitir a conexão da LT-II na barra de transferência, a qual é interligada com a barra principal da subestação via disjuntor de transferência 732.

Para o entendimento da lógica de intertravamento associada a chave seccionadora 755, é importante o conhecimento das seguintes funções:

Tabela 3.14 – Funções de relês

DISPOSITIVO	OPERAÇÃO
73-X1:	dispositivo que opera quando todo o vão de transferência está fechado, ou seja, disjuntor 732 e chaves 731/733 fechadas.
89-2/X:	dispositivo que opera com todas as chaves de <i>by-pass</i> abertas, com exceção da do <i>bay</i> em transferência ou transferido.
73/Z:	dispositivo que opera quando todo o <i>bay</i> de transferência está aberto, ou seja, disjuntor 732 e chaves seccionadoras 731/733 abertas.

Para o comando mecânico da seccionadora 755, a chave seletora deve estar comutada para a posição “desligado”, a alimentação em +125 Vcc deve estar ligada e dentro dos padrões requeridos pelo sistema, o relê 89-2/X deve estar operado, a chave de transferência deve estar na posição “Intermitente” e uma das condições dadas a seguir satisfeitas:

- a) chaves seccionadoras 751 e 753 fechadas, disjuntor 752 fechado e dispositivo 73/X1 operado.
- b) dispositivo 73/Z operado.

Para o comando elétrico local, a chave seletora deve estar posicionada em “Local”, sendo, no mais, validadas as condições discutidas anteriormente, acrescido da necessidade da existência de alimentação AC dentro dos parâmetros exigidos pelo sistema.

Para o comando remoto, todas as condições do parágrafo anterior devem ser satisfeitas, sendo que a chave seletora deve estar setada na posição “Remoto”.

3.4.3.4. CHAVES SECCIONADORAS 771 E 773

A tabela 3.15 mostra as condições de contorno para a operação das chaves seccionadoras 771 e 773.

Tabela 3.15 – Tabela de operação das chaves seccionadoras 771 e 773

TABELA DE OPERAÇÃO DAS CHAVES SECCIONADORAS 771 E 773						
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Comando	
					Mec.	Elétrico
I N T E R T R A V A M E N T O	772	Disjuntor do bay	Pátio	Aberto	X	X

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- comando mecânico:

a) Posicionar a chave BC, seletora de comando “Local-Manual-Remota” em “Manual”;

b) Introduzir a manivela deslocando inicialmente para a esquerda, a tampa de proteção do encaixe da mesma, bloqueando desta forma o comando elétrico da CS através da chave limite BC1. Girar a manivela no sentido desejado para abrir ou fechar. Retirar a manivela após a operação.

- comando elétrico (método convencional)

a) Local:

- Posicionar a chave BC, seletora “Local-Manual-Remoto” em “Local”;

- Girar a chave de comando CAL/CFL para “A” ou “F” para abrir ou fechar respectivamente;

b) Remoto:

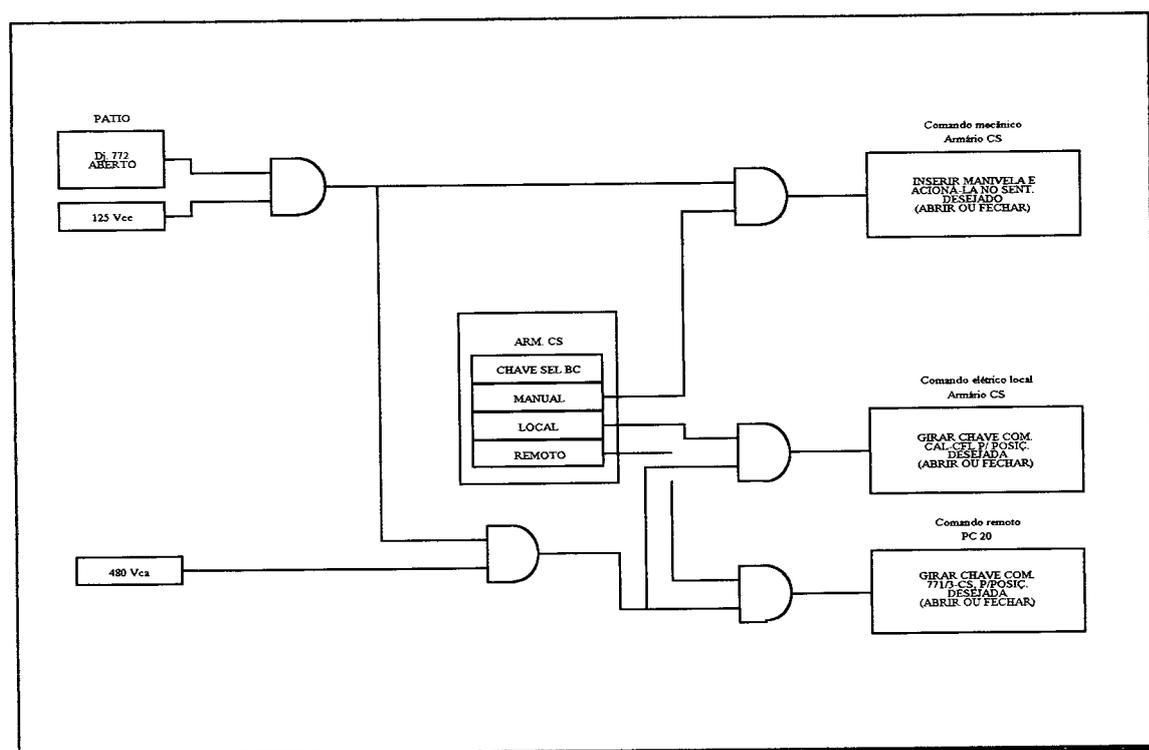
- Posicionar as chaves BC, seletora “Local-Manual-Remoto” das CS’s 771 e 773 em “Remoto”;
- Guiar a chave de comando 771/773-CS, no painel de comando do bay 77 (PC 20) para a posição “A” ou “F” para abrir ou fechar, respectivamente (atuação simultânea das CS’s 771 e 773).

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.31 – Diagrama lógico CS – 771 e CS - 773



Para o fechamento mecânico das chaves seccionadoras 771 e 773, é necessário que a alimentação em +125 Vcc esteja normal, o disjuntor 772 esteja na posição “aberto” e a chave seletora na posição “Manual”.

Para o comando elétrico local e remoto, além dos pré-requisitos anteriores, é necessário que a alimentação em 480 VCA esteja dentro dos limites requeridos pelo sistema e adicionalmente, que a chave seletora esteja na posição “Local” ou “Remota” respectivamente.

3.4.3.5. CHAVE SECCIONADORA 775

A tabela 3.16 mostra as condições de contorno para a operação da chave seccionadora CS 775.

Tabela 3.16 – Tabela de operação da chave seccionadora 775

TABELA DE OPERAÇÃO DA CHAVE SECCIONADORA 775						
	Equip./ comp.	Circuito/ função	Localização	Status	Comando	
					Mec.	Elétrico
I N T E R T R A V A M E N T O	772-43T	Chave transferência proteção	PC-20	Interm.	X	X
	89-2/X	Outras CS's de By-pass (755) abertas	PC-15	Operado	X	X
	73/Z ou	Vão transf. aberto (Dj. 732 aberto e/ou CS 731 aberta e/ou CS 733 aberta)	PC-15	Operado	X	X
	73/X1	Vão transf. fechado (Dj. 732 e CS's 731 e 733 fechadas)	PC-15	Operado	X	X
	772	Dj. do módulo 77	Pátio	Fechado	X	X
	771	CS isoladora Dj. 772	Pátio	Fechado	X	X
	773	CS isoladora Dj. 772	Pátio	Fechado	X	X

Atendidas as condições acima, o comando se dará:

Localmente (no caso real):

- comando mecânico:

a) Posicionar a chave CS/I, B, seletora de comando “Local-O-Remoto”, em “O” (desligado);

b) Acionar a alavanca IM para a posição “Manual” e segurando nesta posição, inserir a manivela em seu encaixe próprio, bloqueando o circuito de força do motor. Girar a manivela no sentido desejado para abrir ou fechar. Retirar a manivela após a operação.

- comando elétrico (método convencional)

a) Local:

- Posicionar a chave CS/L, R, seletora “Local-O-Remoto” em “Local”;

- Girar a chave de comando BA/BF, para “A” ou “F” para abrir ou fechar respectivamente;

b) Remoto:

- Posicionar a chave CS/R, I seletora “Local-O-Remoto” em “Remoto”;

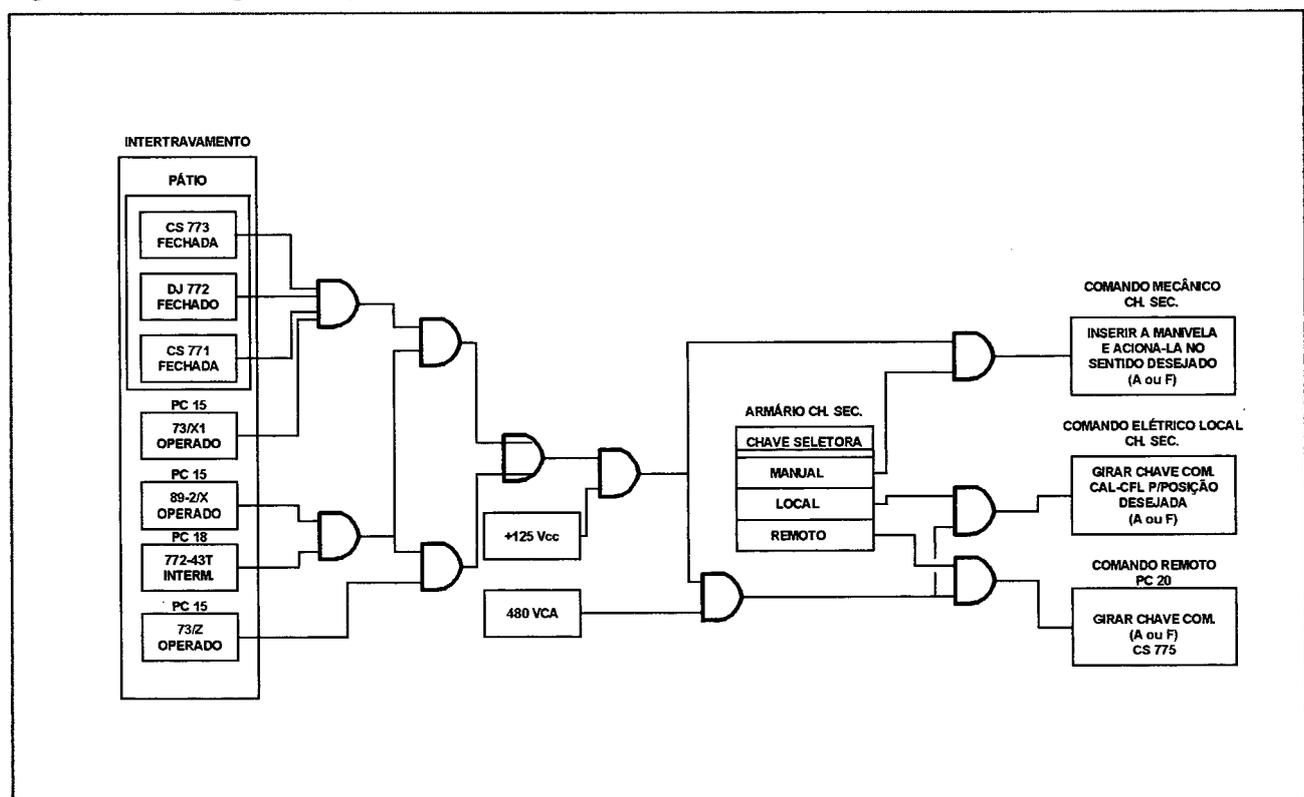
- Girar a chave 775 CS, no painel de comando PC 20, para a posição “A” ou “F” para abrir ou fechar, respectivamente.

Remotamente (Sistema Especialista)

Será relatado no próximo capítulo.

DIAGRAMA LÓGICO

Figura 3.32 – Diagrama lógico CS - 775



A chave seccionadora 755 é uma chave de *by-pass* e tem a finalidade de permitir a conexão da LT-I na barra de transferência, a qual é interligada com a barra principal da subestação via disjuntor de transferência 732.

Para o comando mecânico da seccionadora 775, a chave seletora deve estar comutada para a posição “desligado”, a alimentação em +125 Vcc deve estar ligada e dentro dos padrões requeridos pelo sistema, o relê 89-2/X deve estar na posição “intermitente” e uma das condições dadas a seguir satisfeitas:

- a) chaves seccionadoras 771 e 773 fechadas, disjuntor 772 fechado e dispositivo 73/X1 operado.
- b) dispositivo 73/Z operado.

Para o comando elétrico local, a chave seletora deve estar posicionada em “Local”, sendo, no mais, válidas as condições discutidas anteriormente, acrescida da necessidade da existência de alimentação AC dentro dos parâmetros exigidos pelo sistema.

Para o comando remoto, todas as condições do parágrafo anterior devem ser satisfeitas, sendo que a chave seletora deve estar setada para a posição “Remota”.

3.5. CONCLUSÕES

A integração da operação, supervisão e diagnóstico de falhas em sistemas de Energia Elétrica é importante sob o aspecto de otimização tanto dos recursos humanos quanto das respostas sistêmicas, e essa integração pode ser viabilizada por Sistemas Especialistas.

A otimização das respostas sistêmicas é traduzida pela agilidade e precisão na obtenção dos diagnósticos de falhas, e a otimização dos recursos humanos se reflete na possibilidade de utilização de Sistemas Especialistas para o treinamento ou ainda pela utilização de operadores poucos experientes sem o comprometimento da segurança do sistema.

A implementação de Sistemas Especialistas que respondam as necessidades acima passa pelo entendimento dos processos cognitivos aplicados.

Considerando que a implementação da função intertravamento trabalha com fatos, fica evidente as vantagens da utilização de sistemas baseados em Regras de Produção para emular o raciocínio do especialista e da utilização da *frames* para a modelagem dos automatismos requeridos, logo, este capítulo centro o esforço na explanação das teorias básicas da construção de Sistemas Especialistas baseados em Regras de Produção, mostrando as técnicas usuais de representação do conhecimento.

Capítulo 4: IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA INTEGRADO DE OPERAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS PARA SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA - SODF

Para a implementação do **Sistema Especialista**, foi escolhido como plataforma de desenvolvimento a "shell" **Kappa-PC**.

Essa escolha teve como base a versatilidade do aplicativo, o qual permite a utilização de "regras de produção" e "frames" para o desenvolvimento, possibilitando ferramentas bastantes amigáveis, permitindo sobretudo, o uso da técnica de "programação orientada a objetos".

Em aplicações com o Kappa-PC, cada regra pode especificar um conjunto de condições e um conjunto de conclusões a serem levadas a efeito, se as condições forem verdadeiras. As conclusões podem representar deduções lógicas sobre a base de conhecimento ou especificações de como ele muda ao longo do tempo.

Cada regra é um módulo relativamente independente, assim, podemos construir sistemas de raciocínios graduais, regra por regra.

Uma das vantagens de Sistemas Especialistas em relação as linguagens convencionais é que em Sistemas Especialistas pode-se armazenar o inter-relacionamento entre objetos, conceitos e processos. Adicionalmente, ainda é capaz de acondicionar heurísticas mais qualitativas, tais como "se as chaves seccionadoras associadas ao disjuntor A estão fechadas, há corrente DC e há corrente AC dos serviços auxiliares e também há sincronismo, então o disjuntor do bay pode ser fechado".

A transparência é um outro importante fator de Sistemas Especialistas. Os programas convencionais quase sempre se apresentam como "caixas pretas", onde o usuário não é capaz de ver os passos do processamento. Essa facilidade é muito importante na implementação de problemas complexos.

Para a modelagem dos problemas, necessitamos de ferramentas para a representação dos objetos, os quais simbolizam as "coisas" do mundo, e dos processos, simbolizados pelo comportamento dessas "coisas" do mundo.

Em Sistemas Especialistas, classes e instâncias são usadas para representar as *coisas*, enquanto que as regras podem ser usadas para representar os *processos*.

A programação orientada ao objeto é usada para representar o *comportamento* de objetos individualmente. As regras são utilizadas para representar o *raciocínio* o qual pode ou não se reportar a um objeto individual.

Em Kappa-PC, essas ferramentas se apresentam de uma forma integrada, o que o torna bastante interessante para utilização em desenvolvimentos de Sistemas Especialistas.

Na modelagem dos problemas, devemos implementar a estrutura do problema e o seu processo.

A estrutura do problema é representada pelos objetos (*coisas/conceitos*), enquanto que o processo é representado pelos *métodos, funções e regras*.

Os métodos representam o comportamento das coisas que correspondem aos objetos. Os comportamentos dos 'slots' são especificados pela criação de métodos.

A técnica de se armazenar um comportamento de um objeto como um de seus atributos faz parte da técnica de programação orientada ao objeto.

As funções representam o relacionamento entre *causas* e *efeitos*. Uma regra especifica as condições sobre as quais uma ação particular ou inferência pode ocorrer.

As regras podem especificar uma relação complexa entre os componentes de um sistema.

Em Kappa-PC, a sintaxe para a criação de regras, funções e métodos são idênticas. Raciocínios condicionais realizados com regras podem perfeitamente ser realizados com a programação convencional. Em Kappa-PC, programas podem ser escritos em funções ou métodos, na linguagem KAL.

A utilização de regras de produção se torna mais interessante se um processo de raciocínio requer muitas condições, cuja implementação computacional teria que ser realizada com muitos passos de programa.

No que diz respeito ao uso de Sistemas Especialistas no apoio a decisão com vistas à integração da operação e supervisão de subestações de energia elétrica, existem várias pesquisas em andamento. No que concerne a análise das possíveis combinações de alarmes exteriorizados, o

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL está desenvolvendo um sistema híbrido para a diagnose em Sistema de Potência, utilizando-se de Redes Neurais e Lógica Difusa.

Esse sistema, a partir de uma pré-seleção das falhas feitas pela Rede Neural, se utiliza de sub-sistemas, baseados em Lógica Difusa, os quais analisam os resultados e formam explicações, sendo inclusive capaz de identificar falhas simples e múltiplas de sistemas, além de poderem manipular dados ruidosos. Segundo os autores, o sistema é capaz de ser executado tanto em ambientes DOS quanto em ambiente UNIX [11].

Para a implementação de um módulo de sistema que objetive a integração de soluções particulares e que possibilite uma operação amigável com a redução da especialização requerida para o operador, implementamos um módulo de sistema que visa a automatização via *software* da função intertravamento de uma Subestação de Energia Elétrica, possibilitando o recurso *on-line* de interação com o operador, exteriorizando quando solicitado, os passos necessários para a correta operação da subestação, considerando sobretudo o estado *on time* dos equipamentos e dispositivos envolvidos no processo

Como ponto inicial do trabalho, toda a lógica de intertravamento foi implementada via *software*, a partir da simulação, onde implementou-se *slots* de envio da informações para o mundo externo os quais interagem com *slots* que simulam a confirmação da execução do comando no campo. Toda a lógica de intertravamento, que comumente é realizada através de fiação e reles, no campo, é implementada via *software* a partir da informação/confirmação dos *status* de equipamentos, residentes na base de dados do sistema o qual é alimentado em tempo real, cujos comando foram gerados localmente ou remotamente.

A interface homem-máquina, nesse protótipo, se restringiu a duas telas, uma de entrada, onde é solicitada uma senha que possibilitará a abertura da segunda tela, onde se encontra o diagrama unifilar da subestação e os botões de comando. Nessa última tela, que é a tela principal, é possível a alteração da senha de acesso ao sistema, seja por clique com o *mouse* no botão "ALT SENHA" ou via tecla de atalho "F2".

Para a elaboração da tela principal de operação, procurou-se considerar os aspectos ergonômicos, tais como, exigências sensoriais, sensoriais-motores e mentais, assim, procurou-se levar em conta o fator percepção dos sinais por parte do operador, tais como os dispositivos sinais-comandos e características gerais do operador [12].

Sob essa ótica, foi implementado um *lay-out* de tela que permite uma fácil visualização, com os comandos via botões localizados no próprio diagrama unifilar, em cores selecionadas e associadas a teclas de atalhos.

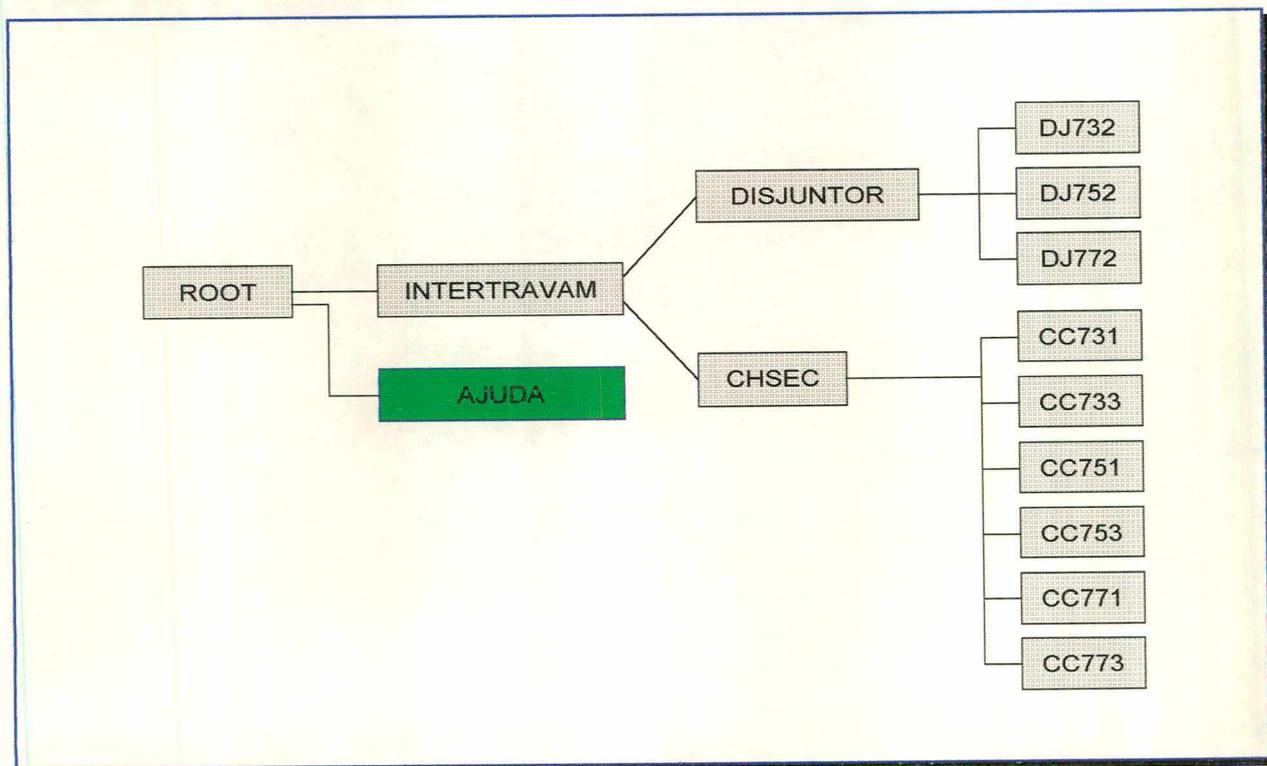
Os botões referentes a mudança de *status* de sistema estão disponibilizados na parte inferior da tela, pelos mesmos motivos anteriormente expostos.

O sistema requer uma terceira tela para a exteriorização de alarmes, a qual não foi implementada por fugir do objetivo do trabalho, que é o de mostrar a viabilidade de um Sistema Especialista que possibilite uma interação tal com o operador, que permita ao sistema a sua operação com um nível mínimo de especialização, acrescida da possibilidade do sistema poder ser utilizado no treinamento de novos operadores.

O sistema tem também o recurso de somente exteriorizar os comandos e informações oriundos de slots, cujas lógicas de intertravamento sejam verdadeiras, inibindo os comandos ou informações cujos pré-requisitos não sejam satisfeitos pelo sistema, com a possibilidade de interagir com o operador através da ativação da função “AJUDA”, explicando os motivos das inibições desses comandos ou informações e mostrando ao operador um caminho viável a seguir para o atingimento do objetivo, possibilitando um acessoramento para as tomadas de decisões.

Para possibilitar a implementação da lógica de intertravamento dos equipamentos constantes no *Layout* apresentado na figura 26, utilizamos *frames*, com o uso da técnica de “Programação Orientada ao Objeto”, cujas classes e instâncias damos abaixo:

Figura 4.1 – Classes e instâncias



Para a implementação da lógica foram criados os *slots* mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela dos slot's

FUNÇÃO	SLOT's	STATUS
Chave seletora LRS	selLRS	L = 0 R = 1 S = 2
+125Vcc	alimCC	normal = 1 anormal = 0
Chave Sec. 731	CS731	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 733	CS733	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 753	CS753	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 751	CS751	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 755	CS755	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 773	CS773	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 771	CS771	aberta = 1 fechada = 0
Chave Sec. 775	CS775	aberta = 1 fechada = 0
Chave 752SS	CH752SS	ligada = 1 desligada = 0
Chave 772SS	CH772SS	ligada = 1 desligada = 0
Chave de transf. 752-43T	trf75243	transferida = 1 não tranf. = 0
Chave de transf. 772-43T	trf77243	transferida = 1 não tranf. 0
Chave 732-CS	CS732	abrir = 1 fechar = 0
Chave 752-CS	CS752	abrir = 1 fechar = 0
Chave 772-CS	CS772	abrir = 1 fechar = 0

Para a representação entre os efeitos e as causas que o geraram, foram implementadas 97 funções, dadas a seguir:

Tabela 4.2 – Tabela de funções

acs731	acs733	acs751	acs753	acs755
acs771	acs773	acs775	adj732	adj752
adj772	bsec731	bsec733	bsec751	bsec753
bsec755	bsec771	bsec773	bsec775	altsenha
chtransfer	com1cs731	com1sec733	com1cs751	com1cs753
com1cs755	com1cs771	com1cs773	com1cs775	com1dj732
com1dj752	com1dj772	com2cs755	com2cs775	com2dj732
com2dj752	com2dj772	comAdj732	comAdj752	comAdj772
comFdj732	comFdj752	comFdj772	comsec	comsec1
cs731	cs751	cs755	cs771	cs775
def731	def733	def731	def733	def751
def753	def755	def771	def773	def775
dessincron0	dessincron1	dessincron2	destransfer0	destransfer1
destransfer2	exit	fcs731	fcs733	fcs751
fcs753	fcs755	fcs771	fcs773	fcs775
fdj7321	fdj7322	fdj7323	fdj7324	fdj7325
fdj7326	fdj7327	fdj7329	fdj7521	fdj7522
fdj7524	fdj7721	fdj7722	fdj7723	help
imagens	senha	sincronismo	traflrem	UNIFSE
x89	Z73			

Para a especificação das condições sob as quais devem ocorrer as inferências, foram implementadas 62 regras, dadas a seguir:

Tabela 4.3 – Tabela de Regras de Produção

adj7321	adj7521	adj7721	adj7722	cs7311
cs7312	cs7331	cs7511	cs7514	cs7534
cs7551	cs7552	cs7553	cs7554	cs7555
cs7556	cs7557	cs7558	cs7711	cs7712
cs7713	cs7714	cs7715	cs7734	cs7735
cs7752	cs7753	cs7754	cs7755	cs7756
cs7757	cs7758	fdj7321	fdj7322	fdj7323
fdj7324	fdj7325	fdj7326	fdj7327	fdj7521
fdj7522	fdj7515	fdj7716	fdj7721	fdj7722
x189	x289	Regra1	Regra2	Regra3
Regra4	Regra5	Regra6	Regra7	Regra8
Regra9	Regra10	Regra11	Regra12	Regra13
Regra14	Regra15			

4.2. DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA

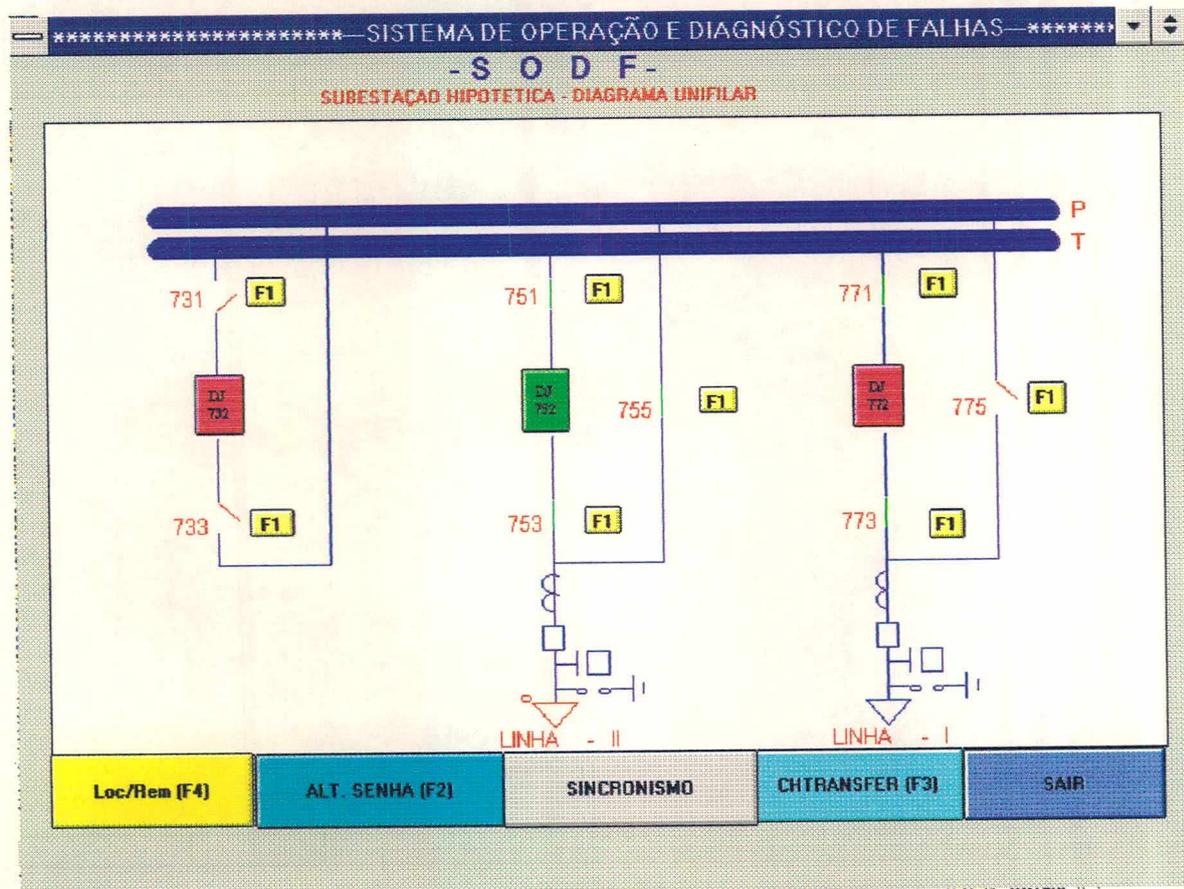
Ao se carregar o sistema, ele abre a tela a seguir:

Figura 4.2 – Tela de entrada do sistema



Nessa tela, o sistema inquiri ao operador sobre a senha, cuja resposta correta é necessária e suficiente para a abertura da tela principal de operação do sistema, dada na página seguinte:

Figura 4.3 – Tela principal do sistema



Uma vez na tela acima, é possível ao operador a alteração da senha, bastando clicar com o mouse no botão “ALT SENHA” ou utilizar a tecla de atalho “F2”.

Clicando-se o botão “ALT SENHA”, o sistema apresentará uma caixa de diálogo solicitando a nova senha.

Para a operação das Chaves Seccionadoras, uma vez na tela principal, deverá se clicar com o mouse no botão ao lado da indicação do equipamento no diagrama unifilar, ou ainda, utilizando-se a tecla de atalho “F1”, conforme indicado no diagrama. Utilizando-se a tecla de atalho, o sistema apresenta uma caixa de diálogo perguntando que Chave Seccionadora se deseja operar, quando então o usuário deverá informar o número operacional do equipamento. Caso se digite um número operacional que não esteja registrado no sistema como um número associado a uma Chave Seccionadora existente, o sistema informará o erro e solicitará para o usuário que tente outro número.

Uma vez digitado o número operacional ou Clicando-se com o mouse no botão correspondente a Chave Seccionadora que se deseja operar, é apresentado uma caixa de diálogo que perguntará ao usuário se o mesmo deseja “Abrir” ou “Fechar” a Chave Seccionadora. Caso se escolha uma opção, em cujo *status* o equipamento já se encontre, o Sistema informará da impossibilidade de se exteriorizar o comando pelo fato do equipamento já se encontrar no referido estado, e após a confirmação do operador, o sistema voltará ao estado inicial, sem que os *slot's* associados ao processo assumam o estado referente ao comando. Nesse estágio, caso se digite um comando que não confira com as alternativas exteriorizadas (Abrir ou Fechar), o sistema informará e solicitará uma nova tentativa.

Caso se digite a alternativa de comando correta, o sistema, através da implementação de *Frames* adequados, baseados em funções implementadas verificarão toda a lógica de intertravamento e caso ela não seja atendida, informará ao usuário da impossibilidade da exteriorização do referido comando. Caso todas as exigências da lógica de intertravamento sejam satisfeitas, o comando é exteriorizado através das mudanças dos *status* dos *slot's* envolvidos. Adicionalmente, é simulado o envio do comando associado ao equipamento e a confirmação de sua execução no campo, quando então, são, após essa confirmação, armazenados na base de dados do sistema os novos valores dos *slot's* e exteriorizado no diagrama unifilar, em tela, nas cores correspondentes, o novo estado do equipamento.

Para a operação dos disjuntores, deve-se clicar com o mouse no botão correspondente ao disjuntor que se quer operar. Isto feito, abre-se uma caixa de diálogo onde é solicitado ao operador a operação desejada, se de “Abrir” ou de “Fechar”. A exemplo das Chaves Seccionadoras, caso o equipamento já esteja no estado referente ao comando, o sistema inibirá o comando e informará que isto ocorreu devido ao equipamento já se encontrar no estado solicitado, voltando o sistema ao estado inicial. Caso se digite um comando desconhecido, o sistema não dará o passo seguinte e informará ao operador, solicitando que seja feita nova tentativa. Uma vez dado o comando, o sistema fará a verificação de toda lógica de intertravamento e caso não haja motivos impeditivos, o comando será exteriorizado e a mudança do estado dos *slot's* envolvidos dar-se-á após a confirmação da abertura ou do fechamento do disjuntor, confirmação essa que é simulada interiormente ao *software*.

Ainda na tela principal, encontramos os seguintes botões, cuja operação é relatada a seguir:

Tabela 4.4 – Tabela de descrição dos botões

BOTÃO	AÇÃO
“Local/Rem (F4)”:	transfere o comando do equipamento selecionado para operação local (pátio) ou remoto (casa de controle no COR). Uma vez clicado esse botão ou teclada a tecla de atalho “F4”, é mostrada uma caixa de diálogo indagando qual o equipamento que

	<p>se deseja transferir, se um Disjuntor ou uma Chave Seccionadora. Caso se digite uma tecla que não DJ ou CS seguido do número operacional correspondente, existente, o sistema informa que foi digitada uma sigla errada e pede para que seja feita uma nova tentativa.</p> <p>Digitando-se uma tecla correta, uma nova caixa de diálogo é aberta, a qual pergunta qual a condição operacional que se deseja para o referido equipamento, se operação Local ou Remota. Nesse estágio, caso se digite uma tecla que não “L” ou “R”, então o sistema inibirá o comando e informará ao operador para tentar novamente. Digitando-se “L” ou “R”, é alterado o <i>status</i> do <i>slot</i> correspondente, o qual deve ser enviado para o mundo externo e cuja confirmação da atualização dessa informação no banco de dados adequado é simulado no <i>software</i>.</p>
<p>“SINCRONISMO”</p>	<p>seleciona o <i>bay</i> que se deseja sincronizar. Uma vez clicado esse botão, é mostrado na tela uma caixa de diálogo indagando qual o <i>bay</i> que se deseja sincronizar. Caso se digite uma tecla que não corresponda aos <i>bay's</i> disponíveis, o sistema informa o erro e inibe a saída do comando.</p> <p>O <i>bay</i> selecionado para o sincronismo é identificado na tela com um círculo vermelho.</p>
<p>“CHTRANSFER”</p>	<p>permite selecionar a linha de transmissão a ser transferida para o <i>bay</i> de transferência. Ao se clicar o botão correspondente, ou ainda, se utilizar a tecla de atalho “F3”, abre-se uma caixa de diálogo indagando qual a Linha de Transmissão que se deseja transferir para o <i>bay</i> de transferência. A exemplo dos comandos anteriores, caso se digite uma tecla que não corresponda a um <i>bay</i> de linha, o sistema inibe o comando e avisa o operador.</p>

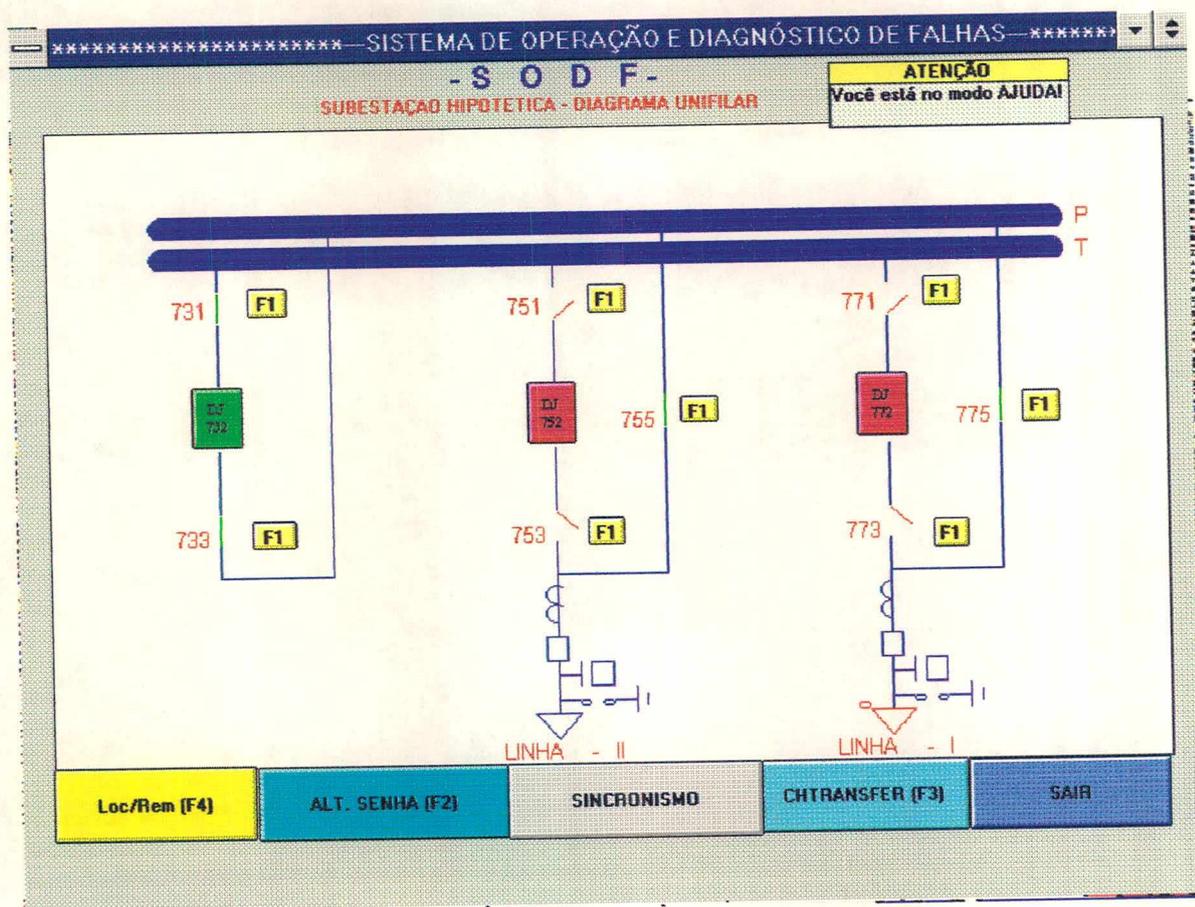
	<p>O <i>bay</i> transferido é identificado na tela pela coloração vermelha do triângulo de indicação da Linha de Transmissão.</p>
“SAIR”	<p>esse botão permite ao operador sair do Sistema de Operação e Diagnóstico de Falhas. Ao sair, o sistema solicita ao operador se o mesmo deseja salvar o estado atual dos <i>slots</i>. É possível também se sair do sistema teclando-se a tecla de atalho “F12”.</p>

4.3. MODO DE AJUDA PARA O APOIO À DECISÃO

Esse sistema foi implementado com vistas a possibilitar o aprendizado dos operadores, ou ainda, a operação do sistema por operadores com pouca experiência, em situações emergenciais.

O Sistema de AJUDA para o apoio à operação é ativado teclando-se a tecla de atalho "F11", quando então é sinalizado uma janela no canto superior direito da tela com os dizeres "ATENÇÃO - VOCÊ ESTÁ NO MODO AJUDA", conforme é mostrado na tela a seguir:

Figura 4.4 – Tela modo ajuda



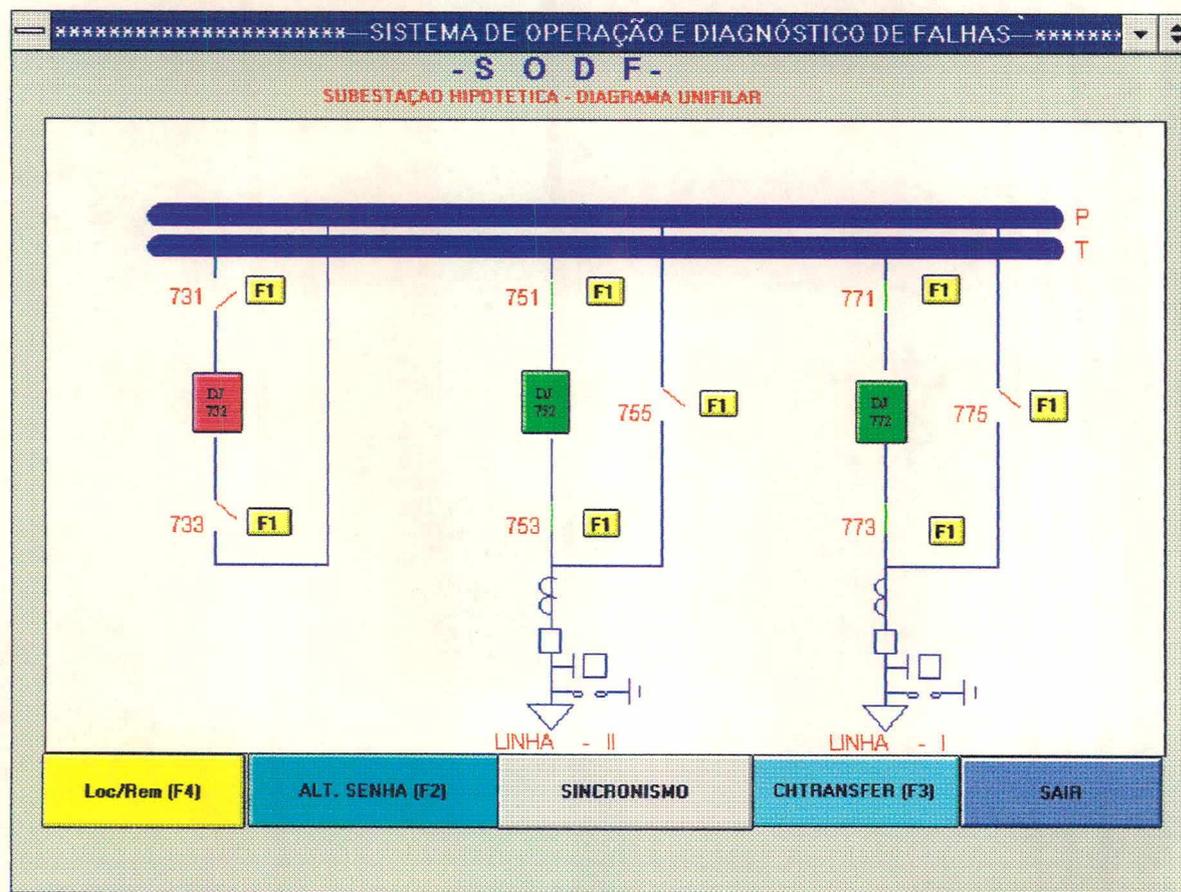
Para uma orientação mais clara do funcionamento do sistema de AJUDA para o apoio à operação, faremos alguns exemplos, mostrando os passos seguidos pelo sistema.

Imaginemos uma situação em que necessitemos isolar o disjuntor “DJ 752” para fins de manutenção no mesmo, e o sistema se encontre nas seguintes condições:

- 1 - todos os *bay*'s na condição normal de operação, ou seja, nenhum *bay* transferido.
- 2 - o disjuntor “DJ732” aberto.
- 3 - as chaves seccionadoras do *bay* de transferência também abertas.
- 4 - o disjuntor “DJ752” na posição fechado.
- 5 - as chaves seccionadoras associadas à Linha II fechadas.
- 6 - o sistema de alimentação em corrente contínua e alternadas funcionando normalmente.
- 6 - a chave de *by-pass* “CS755” aberta.
- 7 - a chave de *by-pass* “CS775” fechada.

Essa condição é dada na tela abaixo:

Figura 4.5 – Tela de exemplo nº 1 do modo ajuda



Para isolarmos o disjuntor "DJ752" deveremos transferir a Linha II para o *bay* de transferência, o que exige uma manobra que requer um razoável conhecimento do sistema operacional. Para que o operador adquira esse conhecimento e a segurança necessária para o exercício seguro de sua profissão são necessários vários cursos e muitas horas de operação.

Para a operação das chaves seccionadoras de *by pass* são necessários os seguintes conhecimentos:

Se o vão de transferência estiver todo fechado, o relê 73-x1 estará operado, logo, nessa condição, para se operar as chaves de *by-pass* é necessário que o disjuntor e as chaves seccionadoras do *bay* associados à chave de *by-pass* estejam fechados.

Caso um dos equipamentos do *bay* de transferência esteja aberto, então o relê 73-z operará e será possível se comandar a chave de *by-pass* independentemente do *status* dos equipamentos associados ao *bay* da chave de *by-pass*.

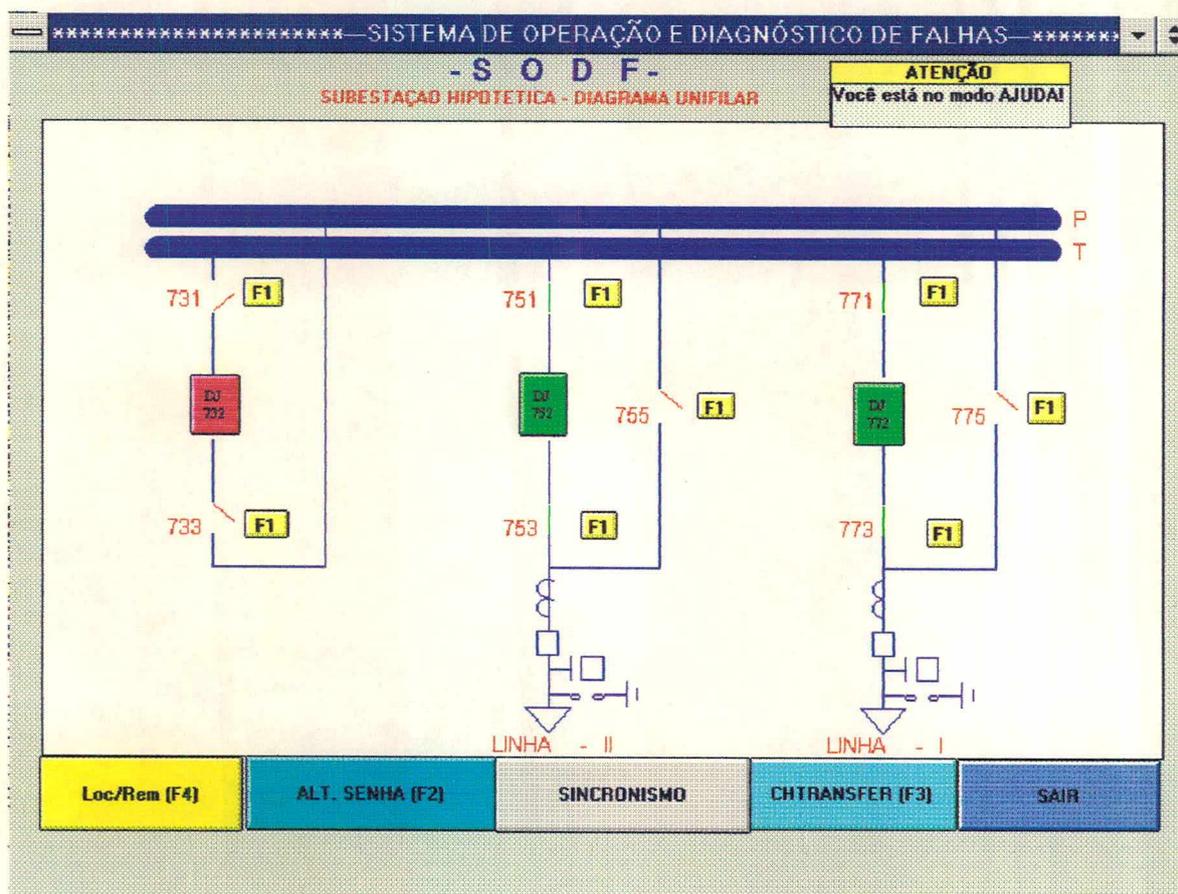
Em ambos os casos, para a operação da chave de *by-pass* é necessário que estejam atendidas as seguintes condições:

- as demais seccionadoras de *by-pass* devem estar abertas, com exceção do *bay* em transferência (operação do relê 89-2/x).
- chave de transferência do *bay* sendo transferido, na posição "I" (intermitente).

No caso de darmos o comando sem que venhamos a observar as condições operativas atuais, o sistema irá inibi-lo e dará o aviso de que "***Não foi possível exteriorizar o comando***", isto porque existem fatores impeditivos para que se possa manobrar a chave seccionadora de *by pass* com segurança. Nessa condição, o operador inexperiente, em condições emergenciais, teria sérias dificuldades para consolidar o isolamento do disjuntor "DJ 752".

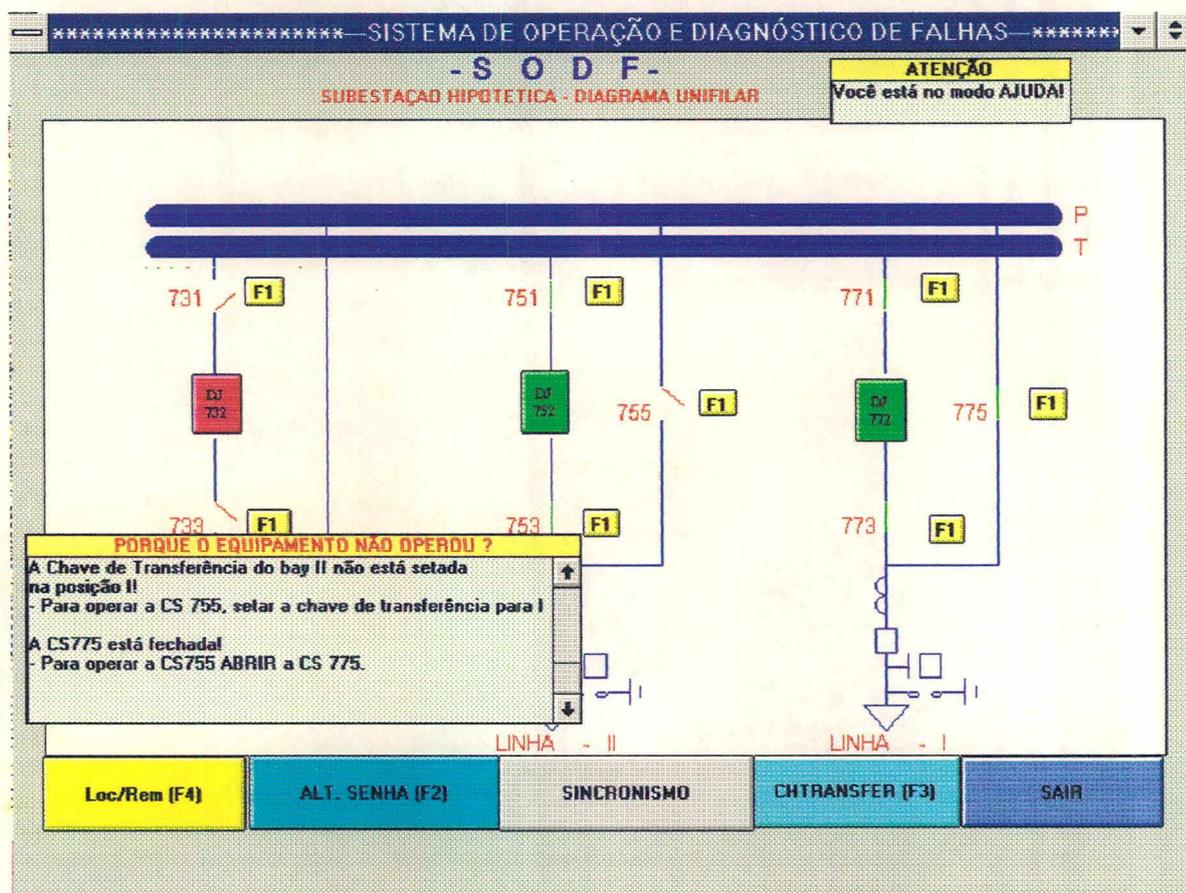
Nessa situação, ele poderá ativar o sistema para entrar no modo "AJUDA" acionando a tecla de atalho "F11", quando aparecerá no canto superior direito da tela uma janela com os dizeres "***Você está no modo AJUDA!***", conforme mostrado na página seguinte:

Figura 4.6 – Tela de exemplo nº 1 do modo ajuda



No modo “AJUDA”, após o sistema avisar da impossibilidade da exteriorização do comando, ele abrirá uma janela informando-o da causa impeditiva e orientando-o quanto aos passos a seguir para o atingimento do objetivo, conforme mostrado na página seguinte:

Figura 4.7 – Tela de exemplo nº 1 do modo ajuda



Os passos indicados para o operador, na janela de AJUDA, são necessários e suficientes para o sucesso da operação, sem que o mesmo necessite deter um conhecimento profundo do mundo que cerca o problema.

Ainda no campo das simulações, vamos tentar comandar o disjuntor do bay de transferência DJ 732.

Para operar o DJ 732 em um sistema convencional, o operador deve no mínimo ter a clara compreensão do seguinte:

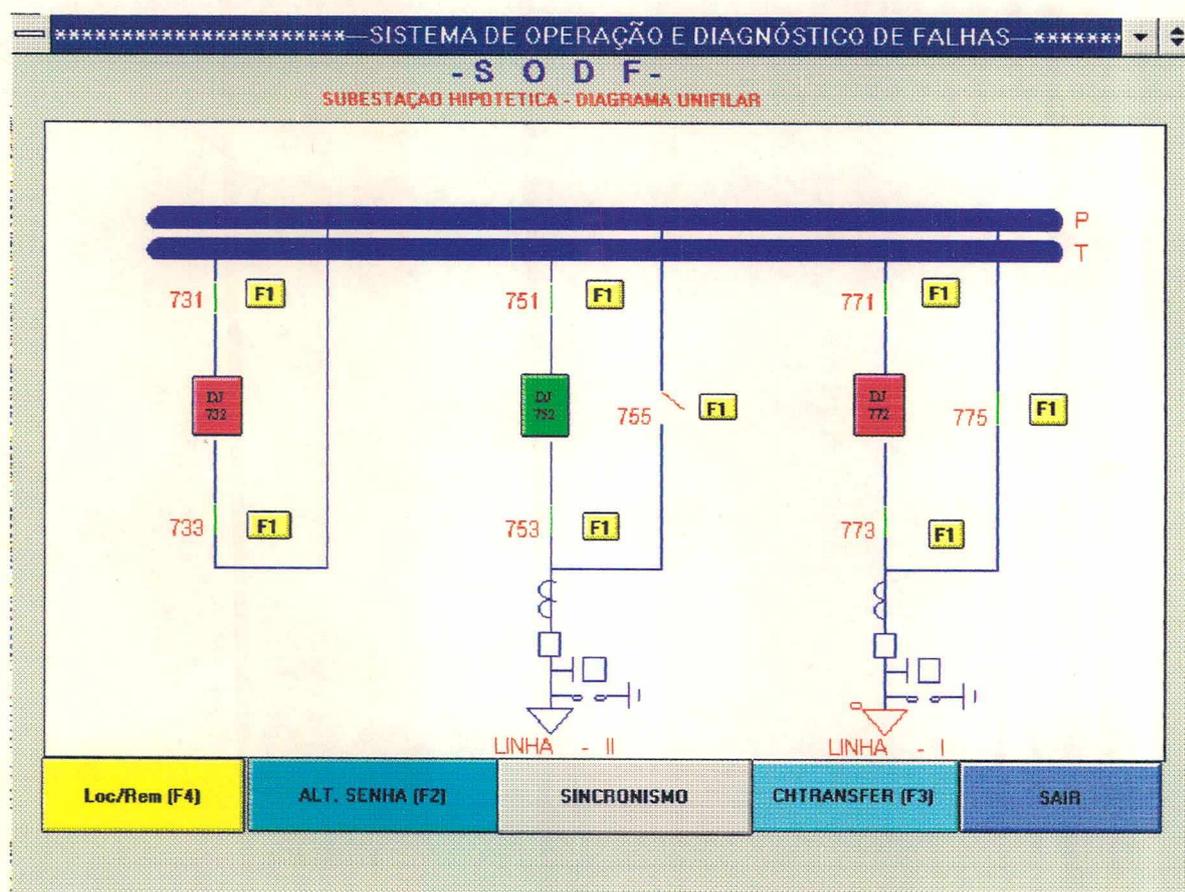
Para fechar o disjuntor 732, a chave de sincronismo “752SS” deve estar ligada e setada para o bay que se deseja transferir. A chave de transferência (CH 43T) deve estar setada para a posição

intermitente (I) ou transferido (T) se simultaneamente as chaves seccionadoras associadas ao disjuntor do *bay* a ser transferido estiverem abertas.

Aliada as informações acima, é necessário que o disjuntor 732 esteja setado para o comando remoto e a alimentação em corrente contínua esteja com o seu funcionamento normal.

Vamos admitir que a subestação encontre-se na situação operacional abaixo:

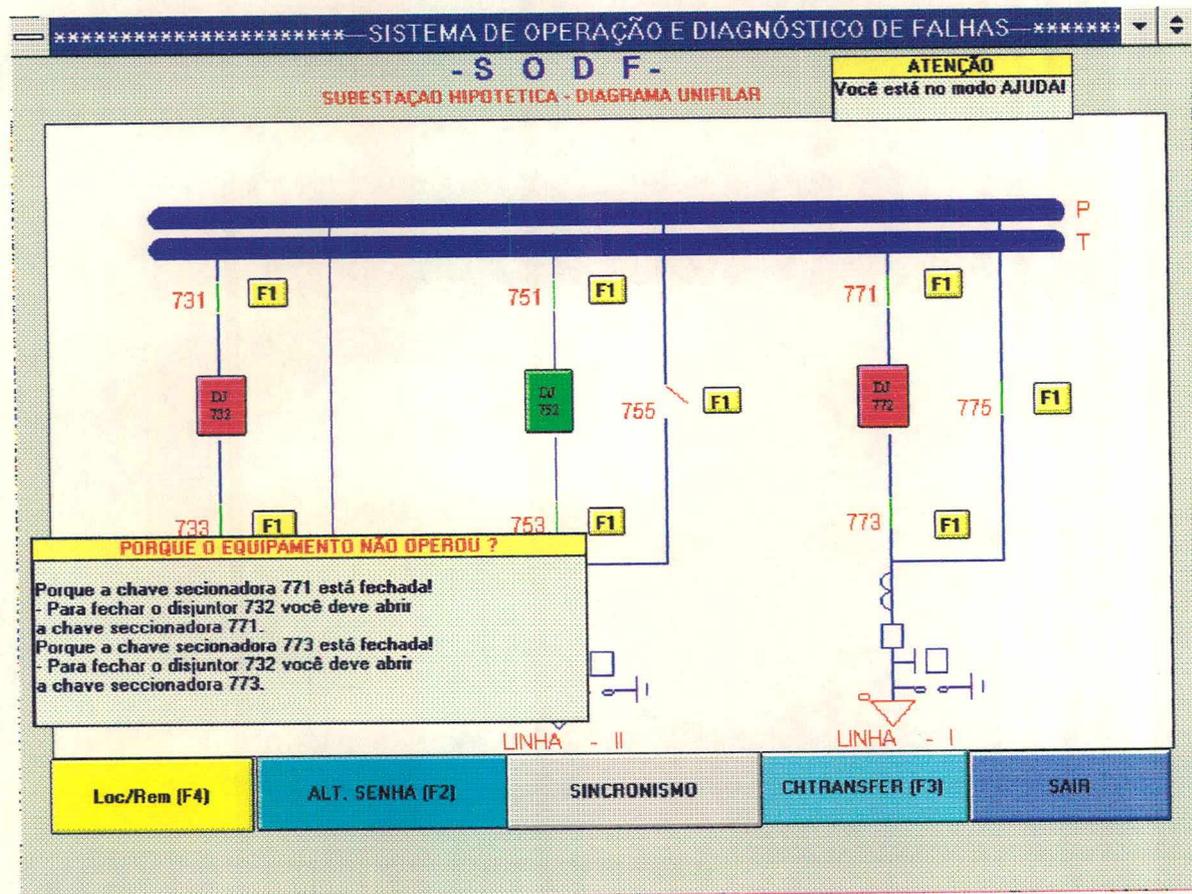
Figura 4.8 – Tela de exemplo nº 2 do modo ajuda



Na condição operacional acima, embora a chave de sincronismo 772SS esteja ligada e setada para o *bay* a ser transferido, a chave de transferência 43T está setada para a posição transferido (T) e as chaves seccionadoras estão fechadas.

Isto feito, o sistema deverá inibir o comando de fechamento e orientar o operador a abrir as chaves seccionadoras CS's 771 e 773, no caso de isolamento do disjuntor 772, conforme a tela a seguir:

Figura 4.9 – Tela de exemplo nº 2 do modo ajuda



A chave de transferência setada na posição “T” significa que a proteção do *bay* em questão está atuando no disjuntor de transferência e portanto o disjuntor 772 deve estar “isolado”, portanto, por razões óbvias, o disjuntor de transferência somente deverá fechar com as chaves associadas ao disjuntor 772 abertas.

Quando do momento da transferência da linha I, a chave de transferência foi setada para a posição intermediária (I), significando que a proteção se solicitada, atuaria nos dois disjuntores simultaneamente. Após a transferência do *bay* a chave de transferência é setada para a posição transferido (T), passando a proteção do *bay* a atuar no disjuntor de transferência.

4.4. CONCLUSÕES

A implementação do protótipo nos permite visualizar a possibilidade da construção de um Sistema Especialista que possibilite a operação de um Sistema de Energia em paralelo com sistemas de automação existentes, acrescido da integração de Sistemas Sub-especialistas específicos, compilados, e residentes em uma tela implementada para esse fim.

A implementação do modo “AJUDA” possibilita ao operador pouco experiente operar o sistema sem prejuízo para a segurança, enquanto que, a partir de um processo interativo o Sistema Especialista mostra ao operador os meios necessários e suficientes para que os objetivos sejam atingidos, ao mesmo tempo que, via meta regras, explana os motivos impeditivos da exteriorização dos comandos dados erroneamente.

Capítulo 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1. CONCLUSÕES

A implementação de Sistemas Especialistas com vistas ao apoio à decisão no gerenciamento de processos é bastante empregado, porém, esses sistemas ainda não estão sendo explorados como apoio à operação de Sistemas de Energia Elétrica, muito embora, temos conhecimento que em vários centros de pesquisa, como no CEPEL, Laboratório de IA do Ceará - LIA (Grupo SINTA - Sistemas Inteligentes Aplicados), MIT - The Massachusetts Institute of Technology - Artificial Intelligence Laboratory, ULBRA - Universidade Luterana do Brasil e em vários centros de excelência, várias pesquisas estão em andamento nesse sentido. Os sistemas atualmente no mercado, na grande maioria, tais como o sistema "Pirâmide" comercializado pela ABB e o sistema "SAGE" desenvolvido pelo CEPEL, não possuem a facilidade de ensinar o operador, uma vez que foram desenvolvidos para substituírem os sistemas convencionais, utilizando-se dos recursos e facilidades que a digitalização possibilita.

A implementação do protótipo objeto dessa dissertação, mostrou sobretudo, o potencial que esses aplicativos podem ofertar, e mais ainda, da gama quase infinita da sua aplicabilidade nesse campo de atuação, utilizando-se de técnicas de Inteligência Artificial, tal como Redes Neurais, Algoritmos Genéticos, Sistemas baseados em Regras de Produção etc.

Poderíamos imaginar um Sistema Especialista tal qual o implementado, com a finalidade de fazer a Integração da Operação, Supervisão e Diagnóstico de Falhas em Sistemas de Energia Elétrica, adequado as realidades de mercado, funcionando em paralelo com os atuais sistemas comerciais. Esse Sistema Especialista teria também como função, a integração de uma série de outros sub-sistemas especialistas, para a resolução de problemas bem definidos, tal como a interpretação de funções de alarmes, o diagnóstico de falhas em equipamentos, a análise das contingências etc., possibilitando uma poderosa alternativa seja como treinamento dos novos operadores, como também, em situações emergenciais, dando aos gerentes e operadores menos experientes, a possibilidade da operação do sistema de forma confiável.

A modularidade desses sistemas, conforme verificado no protótipo, possibilita uma grande agilidade na implementação de novos conhecimentos a partir do engenheiro de desenvolvimento, perpetuando assim o conhecimento adquirido com a experiência.

A utilização de uma modelagem híbrida, ou seja, a utilização de *frames* e regras de produção, com o uso da técnica de programação orientada ao objeto, tornou o aplicativo mais veloz e facilitou sua modularidade.

A implementação do modo “Ajuda” foi possível com a criação de apenas 62 regras, e a implementação de toda a lógica de intertravamento foi realizada com a criação de 109 funções e 42 métodos.

Para futuros trabalhos, sugerimos o aperfeiçoamento do módulo atual, para que o mesmo seja melhor adequado para o funcionamento como módulo integrador, e num sentido mais amplo, poderão ser desenvolvidos Sistemas Especialista, cujos programas compilados poderiam habitar uma tela exclusiva com *lay-out* desenvolvido para esse fim. Esses programas Especialistas poderiam versar entre outros temas sobre: diagnóstico de falhas a partir da depuração e análise dos alarmes da subestação; análise seqüencial de eventos para diagnósticos de falhas da proteção; análise da atuação da proteção e teleproteção; reconhecimento de padrões para fins específicos tais como senhas de entrada em subestações remotas, reconhecimento de operador autorizado para abrir o aplicativo ou operar no Modo Ajuda, entre outros.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - **JARDINI, J.A.** - Sistemas Digitais para automação da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Edição Universitária. 1996.
- [2] - **JARDINI, J. A. ; Magrini L. C.** - **Desenvolvimento de um sistema de automação de subestações pela integração de módulos de software e hardware existentes no mercado brasileiro.** 2º Simpase - Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos Brasileiros - Belo Horizonte. 1994.
- [3] - **ALMEIDA/JÚNIOR/KLINGUELFUS/OLIVEIRA** - **Sistemas Digitais.** Trabalho apresentado no XIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica promovido pela Cigré - Brasil. 1994.
- [4] - **GIARRATANO/RILEY** - Expert Systems, Principles and Programing. Second Edition. PWS Publishing Company, 1993.
- [5] - **DONALD, A. W.** - A Guide to Expert System. Addison-Wesley Publishing Company, 1985
- [6] - **ELAIN, R./KEVIN, K.** - Inteligência Artificial. segunda edição, Editora Makron Books, 1993.
- [7] - Manual de Operação da SE Palhoça - **Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. - ELETROSUL**, 1996
- [8] - **DAVID, G./GAVRIEL, S.** - **Knowledge Representation in Expert System Interface Based on Problem Characteristics** - School of Industrial Engineering, Purdue University - Elsevier Science Publishers B.V., 1989.
- [9] - **KOVÁCS, Z.** - Redes Neurais Artificiais, Fundamentos e Aplicações, Segunda Edição, Editora Collegium Cognition e Edição Acadêmica, 1996.
- [10] - **MAIA, W. U. L. A.** - **Tons de Teleproteção de Equipamentos e Linhas de Transmissão em Sistemas de Telecomunicações de Alta Capacidade de Canalização**, VI Encontro Regional Latino-americano da CIGRÉ. 1995.

- [11] - **SILVA, V. N. A. L./ZEBULUM, R. S. - Sistema Híbrido para Diagnose em Sistemas de Potência utilizando Redes Neurais e Lógica Fuzzi, CEPEL - ELETROBRÁS, Relatório – 1996**
- [12] - **FIALHO, F./SANTOS, N. - Manual de Análise Ergonômica no Trabalho, Editora Gênese, 1995**
- [13] - **REI, H./YOUICHI, M. - Self-adaptation Method in an Intelligent User Interface - C&C Systems Research Laboratories - NEC Corporation, 1989.**
- [14] - **WALSH, P./LONG, J.B. - JSD and the design of user interface software - University College London.**
- [15] - **WALDHOR, K. - Creating Advanced User Interfaces using a knowledge based approach - Elsevier Science Publisher B. V., Amsterdam, 1989.**
- [16] - **HARTLEY, J./SMITH, M. J. - Question answering and explanation giving in on-line help systems. - University of Leeds, England.**
- [17] - **WROBLEWSKI, D./McCANDLESS, T./HILL, W. - DETENTE: Practical Support for Practical Action - Bell Communications Research.**
- [18] - **FININ, T. - Providing Help and Advice in Task Oriented Systems, International Joint Conferences on Artificial Intelligence, Inc., Karlsruhe, West Germany, August 1983.**
- [19] - **FISCHER, G./LEMKE, A./SCHWAB, T. - Knowledge-based Help Systems - published by Elsevier Science Publishers in Human Factors in Computing Systems - II, 18 April 1985.**
- [20] - **FALZON, P./VISSER, W. - Variations in Expertise: Implications for the design of assistance systems, published by Elsevier Science Publishers in Designing and Using Human - Computer Interface and Knowledge Based Systems, 1989.**
- [21] - **POLLACK, M. - An Empirical Study of User/Expert Dialogues - Department of Computer and Information Science, published by Elsevier Science Publishers in Human Factors in Computing Systems - II, 18 April 1985.**
- [22] - **CAUDIL, M. - Neural Network Training TIPS and Techniques, Revista AI Expert, janeiro de 1991.**
- [23] - **BORGES, L./SILVA, A./Lambert, T./RIBEIRO, E. - Algoritmo rápido de treinamento de redes neurais para sistemas de controle em tempo real - 1º**

- Congresso Brasileiro de Redes Neurais - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1994.
- [24] - **KANDIL, N./SOOD, V./DHORASANI, K./ PATEL, R.** - **Fault Identification in an AC-DC Transmission System using Neural Networks** - Revista Transactions on Power Systems, Vol. 7, Nº 2, May 1992.
- [25] - **POTTS, S./MONK, T.** - Borland C++ 4.0 for Windows, Técnicas de Programação, Axcel Books do Brasil Editora, 1994
- [26] - **MONTENEGRO, F./PACHECO, R.** - Orientação a objetos em C++, Editora Ciência Moderna, 1994
- [27] - **KLIR, G./YUAN, B.** - Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Application, Prentice Hall PTR, Inc., 1995
- [28] - **GOLDBERG, D.** - Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [29] - **HAYKIN, S.** - Neural Networks, a Comprehensive Foundation, Macmillan College Publishing Company, New York, 1994.
- [30] - **LAURENCE, F** - Fundamentals of Neural Networks, Architectures, Algorithms and Applications, Prentice Hall International Editions.