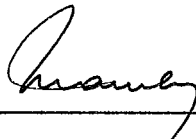


SISTEMAS ESPECIALISTAS APLICADOS A RECOMPOSIÇÃO
DE SISTEMAS ELETRICOS DE POTENCIA

Ronaldo Leite de Almeida Pitta

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
POS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIENCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E
COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

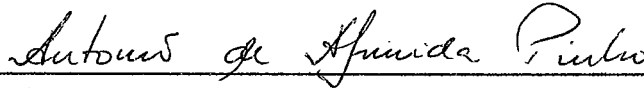


Prof. Nelson Maculan Filho, D.Sc.

(presidente)



Dr. Mário Veiga Ferraz Pereira, D.Sc.



Prof. Antônio Almeida Pinho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO - RJ, BRASIL

ABRIL DE 1991

PITTA, RONALDO LEITE DE ALMEIDA

Sistemas Especialistas Aplicados à Recomposição de
Sistemas Elétricos de Potência (Rio de Janeiro) 1991.
X, 220 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de
Sistemas e Computação, 1991)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Sistemas Especialistas, Centros de Supervisão e
Controle, Recomposição de Sistemas Elétricos.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

AGRADECIMENTOS

Ao dr. Mário Veiga Ferraz Pereira, não só pela orientação eficaz e objetiva, mas pela confiança e estímulo constantes.

Ao prof. Nelson Maculan Filho, pelo incentivo, receptividade e espírito aberto com que acolheu a idéia da tese.

A Luiz Corrêa Lima, pelo apoio durante todo o andamento da tese, pelas discussões e pelo auxílio na programação PROLOG.

A Paulo Cesar Fernandes e a José Antonio Fabiano Mendes, pela indicação de material bibliográfico, e a José Carlos Pitta pelas sugestões ao desenvolvimento do trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

SISTEMAS ESPECIALISTAS APLICADOS A RECOMPOSIÇÃO DE
SISTEMAS ELETRICOS DE POTENCIA

RONALDO LEITE DE ALMEIDA PITTA

Abril, 1991

Orientador: Mario Veiga Ferraz Pereira

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Este trabalho apresenta uma análise da utilização de sistemas especialistas para auxílio à recomposição de sistemas elétricos de potência.

Com base nesta análise, e em uma moderna filosofia de recomposição distribuída, é proposto um sistema distribuído híbrido para auxílio à recomposição, com a utilização de uma arquitetura "blackboard".

São desenvolvidos protótipos em PROLOG para parte do sistema proposto, para verificar a viabilidade da proposta, comprovar a adequação de sistemas especialistas ao problema da recomposição, e estabelecer uma modelagem para o problema.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

EXPERT SYSTEMS APPLIED TO POWER SYSTEM RESTORATION

RONALDO LEITE DE ALMEIDA PITTA

April, 1991

Thesis Advisor : Mario Veiga Ferraz Pereira

Department : System Engineering and Computation

This work presents an analysis on the use of expert systems for power system restoration.

Based on this analysis, and on a modern restoration approach, a hybrid distributed system is proposed for aiding power system restoration, with the use of a blackboard architecture.

Prototypes are developed with the use of PROLOG, in order to verify feasibility of the proposed system, as well as adequacy of expert systems to restoration problem, and to establish some modelling to the problem.

INDICE

cap. I	Introdução	1
cap. II	A Operação de Sistemas Elétricos de Potência....	5
II.1	Introdução.....	5
II.2	A Evolução dos Centros de Supervisão e Controle.	7
II.2.1	Os Despachos de Carga.....	10
II.2.2	Os Sistemas SCADA.....	12
II.2.3	Os Atuais Sistemas de Gerência de Energia...	15
II.3	O Conceito de Controle da Segurança de Operação	18
II.4	O Estágio Atual do Controle da Segurança de Operação.....	26
II.5	A Futura Geração de Centros de Supervisão e Controle.....	31
cap. III	A Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência	35
III.1	Introdução.....	35
III.2	O Procedimento de Recomposição.....	38
III.3	Recomposição Distribuída Versus Centralizada....	41
III.4	Os Planos de Recomposição.....	42
III.5	Estratégias de Recomposição e Linhas Gerais de Ação.....	45
III.5.1	Seccionalização do Sistema.....	46
III.5.2	Recomposição Simultânea dos Subsistemas....	47
III.5.3	Sincronização entre os Subsistemas.....	49
III.5.4	Finalização da Recomposição.....	50
III.6	Uma Filosofia Moderna de Recomposição Distribuída	50

cap. IV	Sistemas Especialistas na Operação de Sistemas Elétricos de Potência.....	57
IV.1	Introdução.....	57
IV.2	Conceitos Fundamentais sobre Sistemas Especialistas.....	60
IV.2.1	Características Básicas.....	60
IV.2.2	Representação do Conhecimento.....	63
IV.2.3	Estratégias de Inferência e Controle.....	65
IV.2.4	Arquitetura Básica de um Sistema Especialista.....	67
IV.2.5	Diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais.....	71
IV.2.5.1	Diferenças Conceituais.....	71
IV.2.5.2	Diferenças Funcionais.....	74
IV.2.5.3	Diferenças de Projeto.....	75
IV.3	Sistemas Especialistas para a Resolução de Problemas de Sistemas de Potência.....	78
IV.3.1	Aspectos Conceituais.....	80
IV.3.2	Aspectos Funcionais.....	82
IV.4	Sistemas Especialistas Aplicados à Operação de Sistemas de Potência.....	84
IV.4.1	Objetivos da Incorporação de Sistemas Especialistas aos Centros de Supervisão e Controle.....	84
IV.4.2	Aspectos da Incorporação de Sistemas Especialistas à Operação em Tempo Real.....	90
IV.4.2.1	Sistemas Especialistas Integrados ao Centro de Supervisão e Controle versus Sistemas "Stand-Alone".....	91
IV.4.2.2	Aspectos Funcionais.....	94

IV.4.2.3	Aspectos de Implementação.....	96
IV.4.3	Alternativas para a Incorporação de Sistemas Especialistas aos Sistemas de Gerência de Energia.....	99
IV.4.4	Facilidades para Manutenção, Treinamento e Testes.....	102
IV.4.4.1	Recursos para Manutenção da Base de Conhecimentos.....	102
IV.4.4.2	Recursos para Validação e Testes.....	104
IV.4.4.3	Recursos para Treinamento.....	105
IV.4.5	Aplicações de Sistemas Especialistas na Operação de Sistemas Elétricos.....	106
cap. V	Sistemas Especialistas na Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência.....	114
V.1	Introdução.....	114
V.2	Formulação Analítica para o Problema da Recomposição.....	116
V.3	Formulação Baseada em Conhecimentos para o Problema da Recomposição.....	120
V.3.1	O Conhecimento Necessário à Recomposição....	122
V.3.2	Sistemas Especialistas Integrados versus Isolados.....	125
V.3.3	Integração com Ferramentas Numéricas.....	126
V.3.4	O Papel dos Sistemas Especialistas : Assistência versus Automação.....	127
V.3.5	Sistema Distribuído versus Sistema Centralizado.....	130
V.4	O Conceito de Sistema Distribuído para	

	Resolução de Problemas.....	131
V.5	Proposta de um Sistema Distribuído Híbrido para Auxílio à Recomposição.....	136
V.5.1	Características Básicas do Sistema.....	137
V.5.2	Arquitetura Proposta para o Sistema.....	138
V.5.3	Descrição Funcional do Sistema.....	142
V.5.3.1	Os Resolvedores de Problemas Algorítmicos.....	143
V.5.3.2	Os Resolvedores de Problemas Baseados em Conhecimentos para a Recomposição Fluente.....	146
V.5.3.3	Os Resolvedores de Problemas Baseados em Conhecimentos para a Recomposição Coordenada.....	149
cap. VI	Um Protótipo de Sistemas Especialistas para Auxílio à Recomposição.....	153
VI.1	Introdução.....	153
VI.2	Um Cenário para a Recomposição Fluente.....	155
VI.3	Protótipo do Monitor da Recomposição Fluente do Sistema.....	162
VI.3.1	Formulação Conceitual.....	164
VI.3.2	Arquitetura do Protótipo.....	168
VI.3.2.1	A Base de Conhecimentos.....	169
VI.3.2.2	O Mecanismo de Inferência.....	172
VI.3.2.3	A Interface com o Usuário.....	178
VI.4	Protótipo do Auxiliar para a Recomposição Fluente da Estação.....	178
VI.4.1	Formulação Conceitual.....	180

VI.4.2	Arquitetura do Protótipo.....	181
VI.4.2.1	A Base de Conhecimentos.....	185
VI.4.2.2	O Mecanismo de Inferência.....	187
VI.4.2.3	A Interface com o Usuário.....	189
cap. VII	Conclusão.....	192
	Referências Bibliográficas.....	197
Apêndice I	Listagem do Arquivo de Definição do Conhecimento do Monitor da Recomposição Fluente do Sistema.....	207
Apêndice II	Listagem da Base de Conhecimentos do Monitor da Recomposição Fluente do Sistema.....	209
Apêndice III	Listagem do Arquivo de Estado do Sistema....	212
Apêndice IV	Listagem do Arquivo de Definição do Conhecimento do Auxiliar para a Recomposição Fluente do Sistema.....	213
Apêndice V	Listagem da Base de Conhecimentos do Auxiliar para a Recomposição Fluente da Estação.....	215
Apêndice VI	Conjunto de Primitivas Construídas para STPC	218
Apêndice VII	Descrição das Regras de Condição e Ação do Conjunto de Primitivas.....	219
Apêndice VIII	Listagem do Arquivo de Estado da Estação....	220

I. Introdução

Os sistemas elétricos de potência atuais atingiram uma tal dimensão em tamanho e complexidade, que a operação segura e econômica dos mesmos é hoje em dia um desafio para as empresas de energia elétrica.

A formação de grandes redes elétricas, através da interligação dos sistemas elétricos das empresas de energia, se por um lado propicia amplas condições de ajuda mútua entre essas empresas, por outro torna crítica a complexidade operativa do sistema interligado.

A sociedade moderna exige um fornecimento confiável e contínuo de energia elétrica. A interrupção do serviço aos consumidores é sempre um grande transtorno, e pode ter consequências sociais e econômicas sérias.

Distúrbios no sistema interligado podem ser suficientemente graves para causar um blecaute extenso em grandes áreas geográficas, e até mesmo um desligamento total do sistema.

O processo de recomposição do sistema interligado é bastante complexo, envolvendo uma série de manobras e ações de controle, tais como partida de unidades geradoras, religamento de equipamentos diversos, reestruturação das malhas de transmissão, sincronização entre partes ilhadas do sistema, tomada de carga, controle de tensão e controle carga-frequência.

Durante a operação normal e rotineira dos sistemas elétricos, os Centros de Supervisão e Controle atuais dispõem de ferramentas eficientes para suporte à tomada de decisão. No entanto, na ocorrência de blecautes no sistema, os recursos disponíveis não são adequados para auxiliar efetivamente os operadores do sistema elétrico.

Nestas situações críticas, os operadores passam a depender bastante de sua experiência operativa para a tomada de decisão. Pressionados pela premência de tempo e pela gravidade da situação, mesmo operadores experimentados tomam decisões que podem se revelar inadequadas ou incorretas.

A prioridade atual da pesquisa relacionada à operação de sistemas elétricos tem sido direcionada ao desenvolvimento de ferramentas que forneçam algum tipo de auxílio durante situações emergenciais.

Sistemas Especialistas para auxiliar ou mesmo automatizar a recomposição de sistemas elétricos vêm sendo considerados uma alternativa promissora. Algumas propostas têm sido apresentadas e protótipos têm sido desenvolvidos. No entanto, a tendência atual para a recomposição distribuída não tem sido considerada.

Este trabalho apresenta uma análise da utilização de sistemas especialistas para a solução do problema da recomposição. São identificados requisitos importantes para um sistema que se proponha a auxiliar a tomada de decisão para a recomposição de um sistema elétrico. Um desses requisitos se refere justamente à necessidade de se levar em conta o aspecto distribuído do problema.

Com base nesta análise, e em uma filosofia moderna de recomposição distribuída, é proposto um sistema distribuído com características híbridas para auxílio à recomposição, utilizando uma arquitetura "blackboard".

Finalmente, é desenvolvido em linguagem simbólica um protótipo de parte deste sistema, com o propósito de verificar a viabilidade da proposta, comprovar a adequação de sistemas baseados em conhecimento ao problema da recomposição, e estabelecer uma modelagem para o problema.

O capítulo II trata da Operação de Sistemas Elétricos. São abordados os Centros de Supervisão e Controle, sua evolução e função atual na operação. São expostos o conceito de controle da segurança, e o seu estágio atual na operação. Finalmente, uma perspectiva é traçada para a futura geração de Centros de Supervisão e Controle.

O capítulo III trata da Recomposição de Sistemas Elétricos. O procedimento de recomposição é enfocado, são abordados aspectos como a tendência à recomposição distribuída, a elaboração de planos de recomposição, e as estratégias de recomposição utilizadas. Finalmente é exposta uma filosofia de recomposição moderna, que está em implantação nas empresas brasileiras de energia elétrica, e que tem como princípio básico a distribuição de atribuições e a simultaneidade de ações para acelerar o processo.

O capítulo IV trata de Sistemas Especialistas na Operação de Sistemas Elétricos. São apresentados inicialmente alguns conceitos gerais, em seguida são abordados aspectos mais

específicos de sistemas especialistas para sistemas de potência, e finalmente são detalhados aspectos importantes dos sistemas especialistas para a operação. São abordados os objetivos da introdução de sistemas especialistas na operação, os diversos aspectos da incorporação de sistemas especialistas aos Sistemas de Supervisão e Controle, e as áreas de aplicação na operação.

O capítulo V trata de Sistemas Especialistas na Recomposição de Sistemas Elétricos. São apresentadas formulações analítica e baseada em conhecimentos para o problema. Os conceitos de sistema distribuído para resolução de problemas e de "blackboard" são expostos, e finalmente é formulada uma proposta de um Sistema Distribuído Híbrido para Auxílio à Recomposição.

O capítulo VI apresenta dois protótipos desenvolvidos em linguagem TURBO-PROLOG para parte do sistema proposto no capítulo V. É apresentado um cenário com base no qual foram desenvolvidos e testados os protótipos, é estabelecida uma modelagem para os problemas tratados e a arquitetura dos protótipos é descrita.

O capítulo VII apresenta a conclusão do trabalho.

Os apêndices apresentam diversos dados relativos à aplicação dos protótipos ao cenário de testes estabelecido no capítulo VI.

II. A Operação de Sistemas Elétricos de Potência

II.1 Introdução

Os sistemas elétricos de potência vêm se expandindo continuamente ao longo dos anos, para atender à crescente demanda de carga dos consumidores.

Esta expansão se traduz na instalação de geração de alta capacidade, de linhas de transmissão em extra-alta-tensão, utilização de tecnologia de transmissão em corrente contínua, formação de grandes malhas de transmissão, e interligação crescente entre as redes de empresas vizinhas.

A operação dos sistemas elétricos interligados atuais tende portanto a ser cada vez mais complexa [1]. As diversas empresas de energia elétrica devem coordenar a troca de energia, o suporte ao controle de tensão, a manutenção da frequência nominal do sistema, e a recomposição do sistema interligado após a ocorrência de um blecaute.

A operação de um sistema elétrico de potência pode ser vista com uma série de ações de controle para atender à demanda dos consumidores, de acordo com certos padrões de confiabilidade e economia [1].

Entende-se por confiabilidade a capacidade do sistema elétrico de atender continuamente à demanda dos consumidores, com um mínimo de interrupção de serviço, na frequência nominal e

dentro de faixas especificadas de tensão.

Atualmente, a operação dos sistemas elétricos é implementada através de uma estrutura hierárquica disposta em vários níveis. Cada nível constitui um órgão operativo com características, atribuições e recursos específicos. Em cada um deles está disponível normalmente um sistema computacional para supervisão e controle.

Assim, usualmente uma empresa de energia elétrica de grande porte opera sua rede através dos seguintes níveis :

- O Centro de Operação do Sistema (COS), onde despachantes de sistema coordenam a operação global do sistema elétrico da empresa, através de um sistema computacional denominado Sistema de Gerência de Energia.
- Os Centros de Operação Regionais (COR), onde despachantes regionais coordenam a operação de determinada área do sistema elétrico da empresa, usualmente através de sistemas computacionais do tipo SCADA.
- as subestações e usinas da empresa, onde operadores de subestação e usina realizam manobras e controles, sob a coordenação dos níveis hierárquicos superiores.

Quando a empresa de energia elétrica faz parte de um sistema interligado, frequentemente é acrescentado a esta hierarquia de operação um nível adicional, correspondente ao Centro de Operação do "pool", ou ao Centro Nacional de Operação.

No caso brasileiro, as principais empresas de energia elétrica da região sudeste-sul do país, como FURNAS, CESP, CEMIG, ELETROSUL, LIGHT, constituem o Sistema Interligado Sudeste-Sul, que é operado pelo COS de cada empresa, sob a coordenação nacional do CNOS - Centro Nacional de Operação do Sistema, da ELETROBRAS.

A figura II.1 representa a hierarquia de operação do sistema Sudeste-Sul, e mais detalhadamente do sistema de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

II.2 A Evolução dos Sistemas de Supervisão e Controle

Os Sistemas de Supervisão e Controle utilizados nos vários níveis hierárquicos de operação de um sistema de potência são compostos por um sistema informativo de suporte, que realiza a supervisão contínua do que está ocorrendo no sistema elétrico, e por funções de controle, manuais ou automáticas [1].

A supervisão é atualmente implementada através de um processo de instrumentação em larga escala, para todo o sistema elétrico. Em cada usina e subestação estão instaladas unidades terminais remotas - UTR, que aquisitam dados de tempos real em varreduras com intervalo de poucos segundos, e enviam estes dados aos sistemas de Supervisão e Controle localizados no COS ou nos COR da empresa.

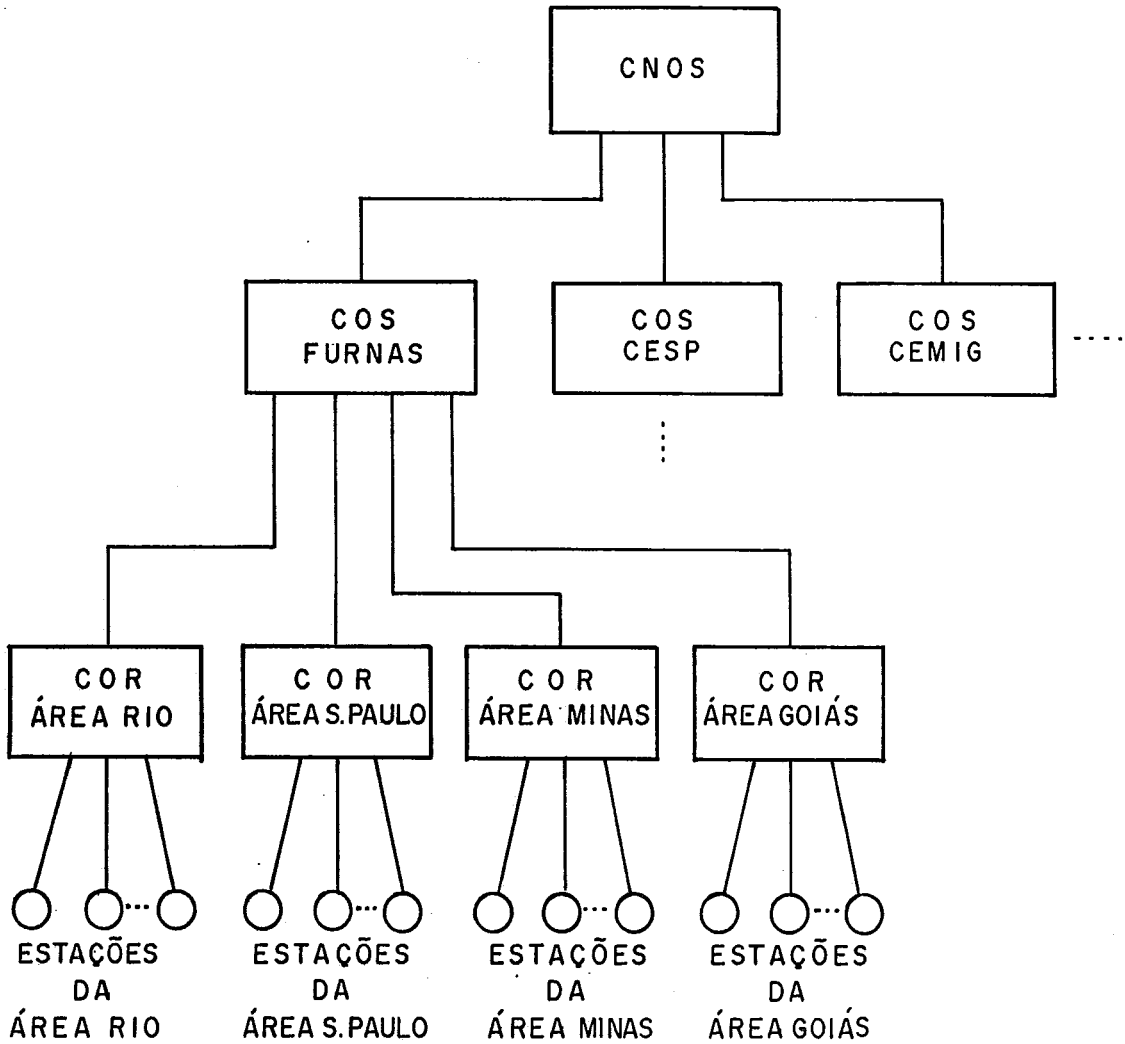


Fig. II 1 - A HIERARQUIA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA INTERLIGADO SUDESTE - SUL

Estes dados de tempo real consistem de estados digitais correspondentes a posições de chaves e disjuntores, e a sinalizações de atuação de relés de proteção, e de telemedições analógicas, correspondentes a grandezas elétricas tais como tensões, potências ativas e reativas, correntes e frequências, entre outras.

As funções de controle se referem tanto à implementação de ações automáticas de controle, como aos meios físicos para interferir no sistema, ou ainda em um sentido mais amplo, a funções para suporte à tomada de decisão [1].

As ações de controle, manuais ou automáticas, estão associadas a vários processos de decisão baseados nas informações disponíveis sobre o sistema, em dados ambientais, conhecimento de engenharia, experiência e intuição [1].

A automação em sistemas de potência decorre da impossibilidade humana de lidar com fenômenos elétricos praticamente instantâneos, como transientes e surtos. Com este objetivo estão incorporados aos sistemas elétricos reguladores de velocidade, reguladores de tensão, e proteções diversas, entre outros dispositivos de controle [1].

Nos Centros de Supervisão e Controle a automação do controle tem sido mais lenta, embora seja uma meta perseguida insistentemente na operação dos sistemas [2]. O melhor exemplo de controle automático bem-sucedido neste nível são os sistemas de malha fechada para controle carga-frequência, denominados Controle Automático de Geração - CAG [1]. Tais sistemas são atualmente imprescindíveis para a operação de um sistema

elétrico de porte.

A grande evolução nos últimos 30 anos dos sistemas de Supervisão e Controle de sistemas elétricos ocorreu na direção dos recursos computacionais para dar suporte à tomada de decisão do pessoal de operação.

A explosão tecnológica na área de computadores e sistemas digitais, aliada ao desenvolvimento da concepção de controle da segurança de um sistema elétrico, causaram a evolução dos tradicionais Despachos de Carga das empresas aos sistemas SCADA, e finalmente aos atuais Sistemas de Gerência de Energia.

II.2.1 Os Despachos de Carga

Na década de 60, os Centros de Operação de Sistema eram denominados Despachos de Carga, e não contavam ainda com computadores digitais para auxiliar os despachantes de sistema.

Os Despachos de Carga tinham as seguintes atribuições básicas:

- despacho de geração : programação horária da disponibilidade das unidades geradoras e do nível de geração das usinas, para atender à demanda programada [3].
- controle da frequência e da tensão, dentro das tolerâncias prescritas.
- programação dos intercâmbios de energia com as empresas vizinhas.

- coordenação da manutenção dos equipamentos de transmissão e geração.
- contabilização de energia.
- tomada de decisões para resolver situações anormais.
- obtenção de informações para preenchimento de relatórios e estatísticas, utilizados em geral para análise pós-operação.

Para cumprir estas atribuições, os Despachos de Carga contavam com os seguintes recursos [4,5] :

- Computadores analógicos para executar o Controle Automático de Geração.
- Interface Homem-Máquina consistindo basicamente de registradores gráficos, e da mesa de controle do CAG, que continha luzes indicadoras e botoeiras de tipos variados.
- Sistema de telemedição analógica, que alimentava o CAG e os registradores gráficos.

Os recursos para supervisão eram bastante limitados. Os dados de tempo real adquiridos pelo sistema de telemedição analógica eram em número reduzido, e seu armazenamento e registro era limitado ao número de registradores gráficos disponíveis [6]. As mesas telefônicas com linhas diretas para as usinas e subestações da empresa eram o meio físico utilizado pelos despachantes para complementar a supervisão do sistema.

II.2.2 Os Sistemas SCADA

No final dos anos 60, o estado da arte evoluiu de sistemas e computadores analógicos para digitais [4]. Os Despachos de Carga foram substituídos por Sistemas de Controle Supervisório e Aquisição de Dados - os sistemas SCADA ("Supervisory Control and Data Acquisition"). Esse sistemas, colocados em serviço em sua maioria nos anos 70, tinham as seguintes características básicas [4,5]:

- Configuração dual redundante de computadores digitais, constituída por dois subsistemas computacionais idênticos, um deles denominado sistema primário, responsável pela execução "on-line" das funções críticas, e o outro, denominado sistema secundário, sempre em "espera quente", e responsável pelas funções não críticas e pelo processamento "off-line". Em caso de falha do primário, o sistema secundário assumia automaticamente suas funções.
- instrumentação em larga escala de todo o sistema elétrico, através de sistemas de telemedição digital e aquisição de dados de alta velocidade.
- interface homem-máquina através de CRTs (tubos de raios catódicos) coloridos semi-gráficos [6].
- controle supervisório, que permitia ao despachante operar remotamente disjuntores e chaves motorizadas, conectar e

desconectar bancos de capacitores e reatores, alterar taps de transformadores e colocar em serviço ou retirar de serviço unidades geradoras [7].

- CAG digital, apesar da opção de muitos centros por manter o CAG analógico, ao menos como reserva [5].

- painéis mímicos dinâmicos do sistema elétrico.

- monitoração da segurança, consistindo em teste contra limites das grandezas elétricas aquisitadas, e de sistemas de alarmes, com utilização de alarmes sonoros, indicações luminosas no painel mímico e textos em telas dos CRTs coloridos, com o objetivo de alertar sobre violações destes limites.

Os sistemas de telemedição digital e aquisição de dados possibilitaram uma supervisão completa e contínua do que ocorria no sistema elétrico. As decisões operativas passavam então a ser suportadas por um conjunto completo de informações, atualizadas por varreduras de aquisição de poucos segundos de intervalo [5].

A evolução entre as duas gerações de Sistemas de Supervisão e Controle não consistiu apenas na modernização dos equipamentos para supervisão e controle, mas também na introdução da aproximação mais abrangente e integrada de monitoração e controle da segurança de um sistema de potência [4].

Assim, a operação dos sistemas elétricos, embora mantivesse as tarefas tradicionais do Despacho de Carga, passou a ser orientada primordialmente para a implementação do controle da segurança [4]. A função de monitoração da segurança dos

sistemas SCADA introduzia de forma incipiente este controle. A operação econômica era um objetivo a ser perseguido após ser garantida a segurança do sistema.

O objetivo a ser alcançado no projeto e implementação de um Centro de Supervisão e Controle seria um sistema global de controle da operação elétrica, que deveria integrar funções de controle manual e automático, onde o homem seria parte integrante deste sistema [4,5].

Este sistema global de controle reconheceria todas as condições de operação do sistema elétrico, e tomaria decisões operativas de forma otimizada, não só em condições normais de operação, mas também durante situações anormais ou de emergência [1,4,5]. Assim, este sistema deveria ter a capacidade de manter o sistema elétrico operando sob todas as condições operativas [8].

Como resultado da introdução de sistemas de controle baseados em computadores digitais, o papel do despachante mudou drasticamente. Suas tarefas, que eram a maior parte do tempo de natureza de registro, tornaram-se mais analíticas, deixando para o computador as tarefas de registrar e apresentar os resultados processados. Cabia ao despachante analisar estes resultados, tomar decisões e executá-las com o auxílio do sistema computacional [9].

II.2.3 Os Atuais Sistemas de Gerência de Energia

A partir da segunda metade dos anos 70, os sistemas SCADA instalados nos COS das empresas foram sendo gradativamente substituídos por sistemas computacionais muito mais poderosos, denominados Sistemas de Gerência de Energia. A velocidade de processamento e principalmente a capacidade de armazenamento em disco e em memória foi tremendamente ampliada.

Um dos objetivos mais importantes para esta substituição, na verdade uma atualização tecnológica, era possibilitar aos novos sistemas de Supervisão e Controle a utilização de programas computacionais complexos, que vinham sendo desenvolvidos com o objetivo de implementar em tempo real a monitoração e o controle da segurança do sistema.

O conceito de controle da segurança do sistema, surgido no final dos anos 60, tinha sido explorado de forma muito incipiente nos sistemas SCADA, através de teste contra limites, e da geração de alarmes.

Na primeira metade dos anos 70, houve um grande surto de desenvolvimento de algoritmos, que procuravam modelar matematicamente os estados operativos de um sistema elétrico, e as melhores decisões de controle para obtenção de desempenho ótimo [1].

Assim, surgiram os fundamentos básicos para o desenvolvimento de funções avançadas para monitoração e controle da segurança, tais como Configuração da Rede Elétrica, Estimacão de Estado, Fluxo de Potência do Despachante, Fluxo de

Potência Ótimo, Análise de Contingências, Análise de Sensibilidade, Equivalentes Externos, etc.

Os novos Sistemas de Gerência de Energia forneceram então recursos computacionais que possibilitaram a implementação de parte dessas funções.

Paralelamente a essa tendência nos COS das empresas, os COR passaram a contar com sistemas do tipo SCADA. Isto causou impacto no projeto de muitos Sistemas de Gerência de Energia dos COS, que não precisavam mais adquirir dados em varreduras cíclicas, diretamente das unidades terminais remotas. Essa função cabia então aos sistemas localizados nos COR, que passavam a enviar dados para os sistemas do COS não mais por varreduras de integridade, mas quando ocorriam variações nos estados digitais ou nas grandezas elétricas [10].

Outra tendência importante, mas que vem sendo implementada de forma mais lenta, é a instalação nas principais usinas e subestações de sistemas digitais para Supervisão e Controle local, em substituição aos recursos analógicos tradicionais.

Os atuais Sistemas de Supervisão e Controle vêm fornecendo à operação dos sistemas elétricos os seguintes recursos adicionais :

- estrutura hierárquica consistindo de vários níveis de sistemas computacionais : centros nacionais, centros das empresas, centros regionais para áreas das empresas, subestações e usinas.

- funções avançadas, de natureza algorítmica, para

monitoração e controle da segurança.

- programas de suporte para programação de geração, intercâmbios, cálculo de reservas, etc.
- computadores "off-line", ligados à tradicional configuração dual, para estudos de apoio, planejamento da operação, treinamento de despachantes, manutenção da base de dados, etc. [7].

Os atuais Sistemas de Gerência de Energia consolidaram os critérios de projeto e performance desenvolvidos na geração dos sistemas SCADA.

De acordo com estes critérios, os sistemas de Supervisão e Controle do sistema elétrico devem ser projetados de forma a [2,5,7] :

- terem alta disponibilidade, entre 99.5 e 99.9% do tempo.
- terem altas taxas de resposta, uma vez que são tipicamente sistemas de tempo real.
- serem de fácil manutenção, ou seja, a manutenção de equipamentos não deve prejudicar a disponibilidade do sistema.

O requisito de alta disponibilidade explica a configuração dual, com esquema automático para falhas [2,7]. A facilidade de manutenção também é uma forte razão para esta configuração.

Um exemplo significativo para as altas taxas de resposta projetadas para o sistema é o critério adotado para o tempo de

apresentação de uma tela nos CRTs coloridos das consoles de operação. Segundo esse critério, o intervalo de tempo entre o instante em que a tela é pedida e o instante em que sua apresentação é completada, não deve ultrapassar 1s em situações normais de operação, e 5s em situações de emergência [2,7,11].

II.3 O Conceito de Controle da Segurança de Operação

No final dos anos 60, Dy Liacco e outros [1,3,4,7,12] desenvolveram um modelo conceitual para formalizar o conceito de segurança de um sistema elétrico, seus possíveis estados operativos, e uma filosofia de controle da segurança do sistema elétrico.

Segundo Dy Liacco, o objetivo da operação de um sistema elétrico deveria ser o controle da segurança desse sistema.

Segurança de um sistema elétrico seria a habilidade do mesmo em ser operado mantendo seus equipamentos dentro de suas limitações físicas, e atendendo à demanda dos consumidores, mesmo em face da ocorrência de distúrbios menores.

Historicamente, a segurança do sistema era aproximada pelo planejamento e construção de sistemas estruturalmente robustos, capazes de suportar uma série de distúrbios [12].

No planejamento de um sistema era simulada sua resposta a um conjunto hipotético de distúrbios severos. Tais testes

serviam para medir a capacidade do sistema em suportar um espectro inteiro de distúrbios. Sistemas projetados com tais critérios provaram ser confiáveis sob as circunstâncias usuais [12].

Contudo, nenhuma garantia absoluta de performance confiável pode ser fornecida no projeto de um sistema elétrico. A segurança de um sistema não pode ser garantida estruturalmente, não importa o quão bem projetado seja o sistema. Ela está ligada a aspectos conjunturais, sendo responsabilidade do pessoal de operação manter a operação efetiva do sistema sob todas as circunstâncias [12].

O processo que se deseja controlar, a operação de um sistema elétrico, é um dos mais avançados processos industriais, envolvendo produção, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica [9]. A implementação de um controle global único é impraticável, por ser o problema global muito complexo e de dimensionalidade muito alta para ser resolvido analiticamente em um único nível [1].

A filosofia de controle proposta por Dy Liacco é baseada no conceito de multi-níveis, que procura decompor um problema complexo em subproblemas mais simples. As interações entre as soluções dos subproblemas são então coordenadas para alcançar o objetivo global [1].

A operação elétrica de um sistema é decomposta em três modos de operação ou estados operativos: normal ou preventivo, emergência e restaurativo [1].

Assim, o complexo problema operativo global é fragmentado em três subproblemas operativos distintos, com diferentes objetivos ou estratégias de controle [4].

A estratégia global de controle é manter o sistema no estado normal [1]. Se o sistema está no estado normal, outros objetivos operativos, como a economia, podem ser considerados [2].

Os estados operativos de um sistema elétrico são definidos com base em dois conjuntos de restrições, sob as quais o sistema opera : restrições de carga e restrições operativas [1,3,4,7,12].

As restrições de carga consistem no requisito de que as demandas de carga dos consumidores devem ser atendidas pelo sistema. Matematicamente as restrições de carga podem ser expressas na forma de equações de fluxo de potência, e por isso são também denominadas restrições de igualdade.

As restrições operativas estabelecem limites operativos superior e inferior para as variáveis do sistema, e traduzem limitações relativas à operação do sistema tanto em estado estacionário quanto sujeito a problemas de estabilidade transitória. Essas restrições são expressas por inequações, estabelecendo limites para carregamentos de equipamentos, tensões em barramentos, diferenças de ângulos de fase, potências ativas e reativas de unidades geradoras, etc. Estas restrições são também denominadas restrições de desigualdade.

Um sistema está no estado normal ou preventivo quando todas

as restrições de carga e operativas estão sendo atendidas. Isto indica que a geração é adequada para suprir a demanda total existente, e que nenhum equipamento está sobrecarregado [12]. O sistema está sendo operado de modo que as demandas de todos os consumidores estão sendo atendidas na frequência nominal e nas tensões operativas desejadas.

Um sistema está no estado de emergência quando restrições operativas estão sendo violadas. O estado operativo de emergência surge quando o carregamento de algum componente é excedido, ou quando a tensão de um consumidor não é mantida numa faixa adequada, ou a frequência do sistema começa a decrescer, ou ainda quando o sistema elétrico entra em processo de perda de sincronismo [1].

Um sistema está no estado restaurativo quando as restrições de carga não estão sendo completamente satisfeitas. Assim algumas cargas não estão sendo atendidas, caracterizando uma interrupção de serviço aos consumidores. De acordo com a extensão dessa interrupção, fica caracterizado um blecaute parcial ou total do sistema. No caso de um blecaute parcial, o sistema reduzido pode se encontrar no estado de emergência, o que pode acarretar numa deterioração em cascata que leve a um colapso total [4].

O estado normal é ainda subdividido em dois sub-estados: seguro e inseguro. Um sistema está no estado normal seguro quando tem a capacidade de suportar distúrbios que impliquem em desligamento de equipamentos, sem no entanto entrar no estado de emergência. Um sistema está no estado inseguro se a perda de

determinados equipamentos pode levá-lo ao estado de emergência. A segurança de um sistema é portanto a capacidade do mesmo de sofrer distúrbios sem migrar para o estado de emergência [8]. Tais distúrbios são denominados contingências.

O estado normal inseguro é denominado estado alerta, por alguns autores [12].

Obviamente, se fossem consideradas todas as contingências possíveis, seria impossível um sistema se encontrar no estado seguro. Na prática, para avaliar a segurança de um sistema define-se um conjunto de contingências para as quais o sistema deve manter-se no estado normal. Esse conjunto de contingências inclui em geral todas as contingências simples de linhas de transmissão, transformadores e de unidades geradoras, e algumas contingências múltiplas (perda de mais de um equipamento) consideradas importantes para a operação [4].

Na figura II.2, linhas sólidas indicam as transições de estado por ações de controle efetuadas no sistema. Genericamente tais ações são denominadas controles preventivo, de emergência e restaurativo. Já as linhas pontilhadas representam as mudanças de estado devido a circunstâncias inevitáveis ou a ações de controle incorretas.

No estado normal seguro, as margens de reserva para transmissão e para geração são suficientes para prover um nível adequado de segurança com respeito aos desgastes aos quais o sistema pode estar sujeito [12].

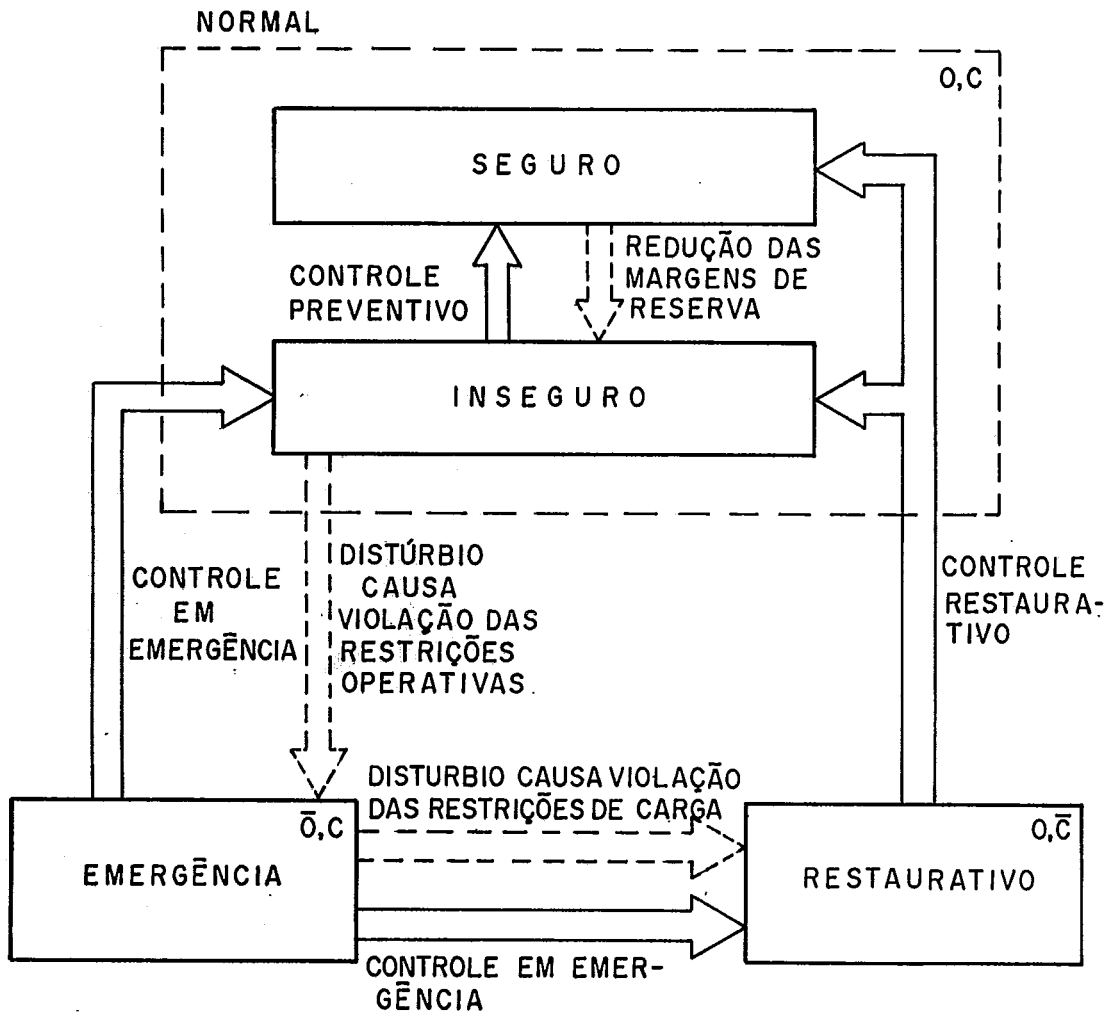


Fig.II 2 - ESTADOS OPERATIVOS E SUAS TRANSIÇÕES

Se o nível de segurança cai abaixo de um determinado limite, o sistema entra no estado alerta. Neste estado, todas as restrições continuam sendo satisfeitas, mas as margens de reserva existentes são tais que algum distúrbio pode resultar na violação de algumas restrições de desigualdade, ou seja, equipamentos seriam sobrecarregados mais ou menos severamente acima de sua capacidade [5,12].

O controle preventivo, exercido no estado inseguro, deve então tomar ações preventivas que procurem restabelecer o estado normal seguro [12]. Restabelecido o estado seguro, o objetivo do controle preventivo passa a ser manter indefinidamente a satisfação da demanda dos consumidores, sem interrupção e a um custo mínimo [1].

O agravamento da situação anterior, ou a ocorrência de um distúrbio suficientemente severo, antes que alguma ação preventiva tenha sido tomada, podem levar o sistema ao estado de emergência.

No estado de emergência, as restrições de desigualdade são violadas, embora o sistema ainda permaneça intacto.

O controle em emergência deve então ser iniciado, para tomar ações corretivas a fim de restabelecer pelo menos o estado alerta, e evitar posteriores degradações, procurando ao máximo satisfazer as demandas dos consumidores [1].

Há situações em que o controle em emergência terá que

rejeitar carga dos consumidores. Nesse casos, o controle em emergência leva o sistema ao estado restaurativo [1].

A transição para o estado restaurativo pode se dever a um distúrbio de grandes proporções, se o sistema está no estado normal, ou mais usualmente à ocorrência de distúrbios menores, se as medidas corretivas no estado de emergência não forem tomadas a tempo, ou forem ineficazes.

Neste caso, o sistema pode entrar em colapso, não permanecendo intacto. Durante o colapso, nem as restrições de igualdade, nem as de desigualdade são satisfeitas. Alguns autores [12] consideram esta fase de colapso como um quarto estado, denominado "in extremis". Em geral, o colapso do sistema é muito rápido, e as ações de controle são automáticas, sem muita participação dos despachantes. Proteções, rejeição de carga por atuação de relés de subfrequência, e esquemas de ilhamento automático são acionados automaticamente com o objetivo de salvar tantas partes do sistema quanto possível de um colapso total [12].

Após o estancamento do colapso, o sistema entra no estado restaurativo. O controle restaurativo procura então retomar toda a carga perdida e reconectar o sistema, num mínimo de tempo [1]. Deste estado, o sistema deve evoluir para o estado seguro, ou pelo menos para o alerta, dependendo das circunstâncias [12].

O reconhecimento do estado do sistema pode ser encarado como um problema de reconhecimento de padrões. Se o padrão atual das condições de carga, geração, e do sistema de transmissão pode ser reconhecido como uma situação perigosa, então medidas preventivas ou corretivas podem ser tomadas para

melhorar o padrão [1].

As definições para caracterizar estes estados não são muito precisas. O julgamento se o sistema mudou de um estado para outro está sujeito a um certo grau de subjetividade, e pode ser bastante arbitrário. Contudo, os conceitos apresentados fornecem linhas de conduta ou orientação para os controles que devem ser efetuados sob certas circunstâncias, ou as decisões operativas a serem implementadas [12].

II.4 O Estágio Atual do Controle da Segurança de Operação

Atualmente, o interesse primordial e de maior impacto no projeto dos Sistemas de Gerência de Energia é o controle efetuado no estado normal [4].

De acordo com o conceito de controle da segurança, o objetivo da operação de um sistema de potência pode ser redefinido como manter o sistema operando no estado normal, prevenindo ou minimizando as transições deste estado para os estados de emergência ou restaurativo [4].

Basicamente o desenvolvimento e implementação de funções nesta área representa o estado da arte em centros de controle de sistemas elétricos. Toda a ênfase é dada à prevenção de situações de emergência que possam levar a danos nos equipamentos e principalmente a blecautes [4,5,7].

Os Sistemas de Gerência de Energia dispõem atualmente de pacotes de programas, de natureza algorítmica, para suporte em

tempo real à tomada de decisão dos despachantes durante a operação normal do sistema.

Assim, foram desenvolvidos e implantados programas como Configurador da Rede Elétrica, Estimação de Estado, Análise de Contingências, Fluxo de Potência Ótimo, Fluxo de Potência do Despachante, entre os mais típicos. Estas ferramentas implementam parcialmente o controle preventivo, mas devido a limitações de natureza algorítmica, são inadequadas para o suporte à tomada de decisão em outras situações operativas.

O estado da arte atual ainda não fornece suporte analítico adequado em tempo real, que auxilie os despachantes no seu processo de tomada de decisão em relação aos estados restaurativo e em emergência. Os controles de emergência e restaurativo necessários para um completo controle da segurança têm sua implementação até agora muito limitada [4,13].

Afora os esquemas de proteção de subfrequência, e poucos sistemas de malha fechada que iniciam automaticamente alívio de carga, de geração e esquemas de ilhamento do sistema, o despachante é responsável por todos os controles de emergência [3,5].

Durante situações de blecaute, as empresas de energia elétrica contam apenas com planos pré-estabelecidos, obtidos de estudos "off-line", para auxiliá-los no procedimento de restabelecimento do serviço. Tal procedimento é denominado Recomposição do sistema elétrico. Esses planos de recomposição não estabelecem alternativas para todo e qualquer cenário que se apresente, mas fixam apenas linhas gerais ou preferenciais de

conduta. A experiência do pessoal de operação envolvido é crucial para adaptar as linhas gerais do plano à situação real.

A figura II.3 apresenta um diagrama representativo do controle da segurança disponível nos Sistemas de Gerência de Energia atuais.

A função de Monitoração do Estado [14] determina o estado operativo atual do sistema elétrico. Esta função era implementada nos Sistemas SCADA pelo cheque contra limites dos dados brutos aqusitados em tempo real. A incorporação a esta função de técnicas de Estimção de Estado e de algoritmos para Configuração da Rede permitiu uma filtragem dos dados brutos, sujeitos a erros [4,7].

Se o sistema está no estado normal, resta determinar se o estado é seguro ou inseguro. Isto é efetuado pela função de Monitoração da Segurança, que consiste na execução de programas de Modelagem do Sistema Externo e de Análise de Contingências [14].

A Análise de Contingências simula, a partir do estado atual do sistema, a ocorrência de uma lista de contingências. Se pelo menos uma contingência pode causar uma emergência, o sistema é considerado inseguro, e o controle preventivo é acionado.

A função de análise de contingências deve informar ao operador que contingência está causando a insegurança e de que natureza e severidade seria a emergência causada [7].

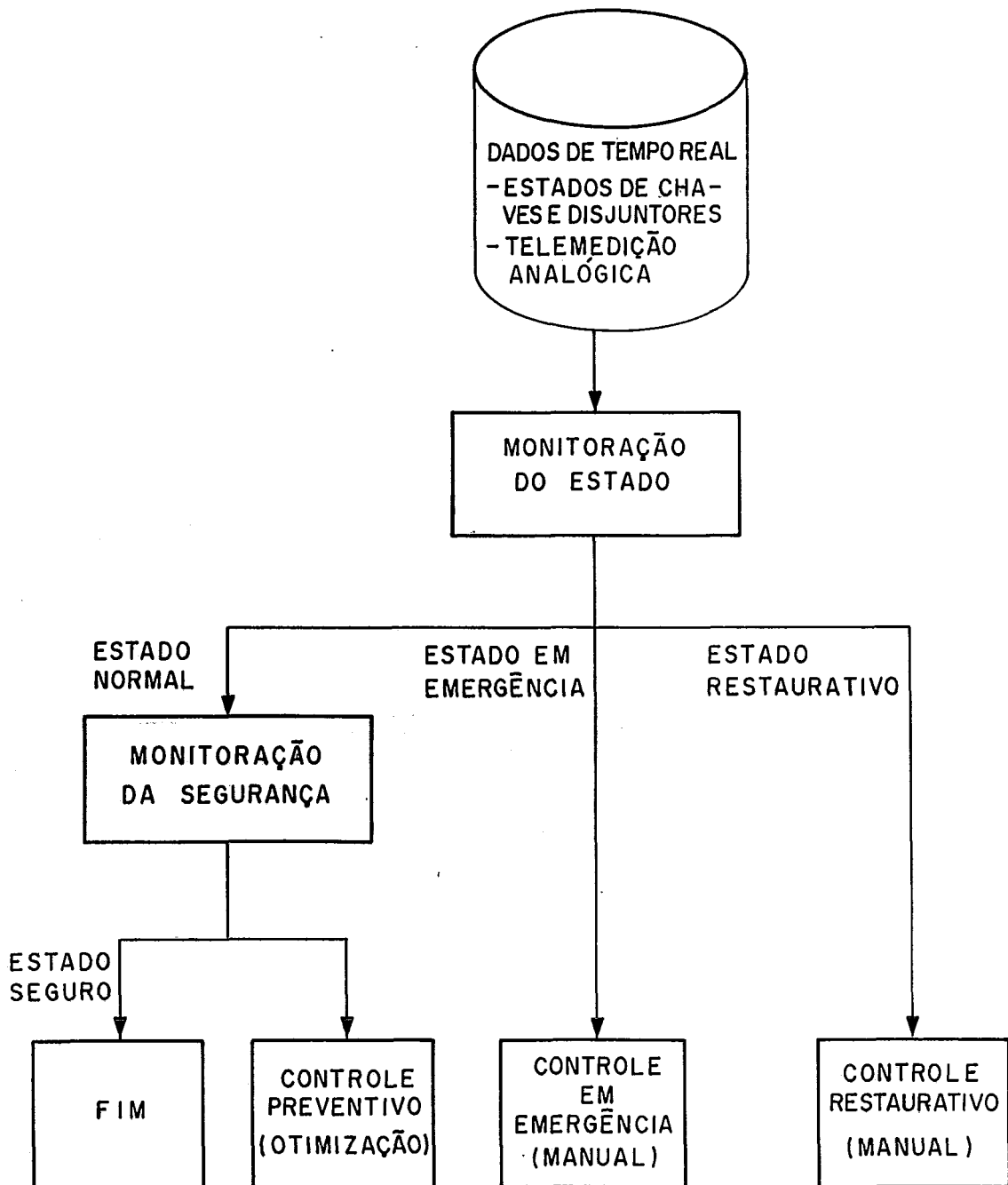


Fig. II 3 - CONTROLE DA SEGURANÇA ATUAL .

Se o sistema está no estado inseguro, o controle preventivo é acionado para determinar que ações preventivas podem ser tomadas para recolocar o sistema no estado seguro [4].

O controle preventivo está em geral parcialmente implementado nos Sistemas de Gerência de Energia. Ações preventivas envolvem técnicas de otimização, que poderiam considerar questões econômicas. Deveria ser avaliado o custo de se manter o sistema seguro contra a severidade da emergência causada pela contingência. Caso o custo fosse alto, e a emergência não fosse muito severa, o despachante poderia assumir o risco e decidir não tomar ações preventivas [7].

Programas de Fluxo de Potência Ótimo, Fluxo de Potência do Despachante, e Análise de Sensibilidade, são em geral utilizados no controle preventivo.

Caso a Monitoração do Estado determine que o sistema não se encontra no estado normal, os controles em emergência e restaurativo são acionados. Conforme mencionado, estes controles são considerados controles manuais e implementados unicamente pelo julgamento do despachante.

Durante a operação em emergência ou no estado restaurativo, o despachante continua contando com recursos como o controle supervísório e a supervisão em tempo real.

Assim, em caso de emergências severas, o despachante tem possibilidade de atuar remotamente sobre o sistema, por exemplo, rejeitando carga, através do controle supervísório.

Em situações de blecaute, o despachante utiliza a supervisão de dados brutos de tempo real, e o cheque contra limites, para acompanhar a evolução do sistema, através dos estados de chaves e disjuntores, fluxos de potência, tensões, e frequência [7].

II.5 A Futura Geração de Centros de Supervisão e Controle

A atual geração dos Centros de Supervisão e Controle ainda está vinculada a especificações e concepções estabelecidas há 15 anos atrás para a geração SCADA [15].

Atualmente, novos avanços tanto em hardware como em software permitem substituir a arquitetura fechada dos Sistemas de Gerência de Energia, baseada numa configuração dual rígida, por arquiteturas mais abertas, baseadas em multiprocessadores.

A tecnologia atual de redes locais permite a conexão de equipamentos diversos através de um meio de comunicação comum, que possibilita a troca de informações em alta velocidade [15].

Assim, através de uma rede ETHERNET, podem ser integrados hardwares bastante heterogêneos, como micros, super-minis, processadores paralelos, e estações de trabalho.

Os seguintes ganhos potenciais podem ser obtidos através desta arquitetura [15]:

- o sistema atual já instalado não é comprometido por uma expansão deste tipo.
- a velocidade de processamento pode ser grandemente aumentada, pela distribuição de tarefas entre os diversos computadores, e pela adequação das características da tarefa à potencialidade da máquina.
- a confiabilidade pode ser grande, através da replicação de tarefas em diferentes máquinas.
- a evidente flexibilidade, pela conexão de máquinas heterogêneas através de meio físico comum.

Do ponto de vista de software, este tipo de arquitetura permitiria [15]:

- desenvolver programas de aplicação baseados em processamento paralelo.
- desenvolver programas baseados em técnicas de Inteligência Artificial.

O processamento paralelo poderia ser utilizado para viabilizar a implementação dos controles preventivo e em emergência.

Assim, programas para redespacho de geração, reconfiguração da topologia através de chaveamentos, e simulação do corte seletivo de carga, poderiam ser implementados através de técnicas de decomposição e de processamento paralelo, para implementar o controle corretivo em emergência [15].

A utilização do processamento paralelo permitiria por exemplo substituir a simulação sequencial de um conjunto de ações de controle ou de contingências, a partir de mesmo ponto base, por simulações paralelas e simultâneas. No caso do controle preventivo, a análise de contingências seria bastante beneficiada.

Do ponto de vista de utilização de Inteligência Artificial, poderiam ser utilizadas máquinas adequadas a este tipo de processamento, para implementar uma série de funções, dentre as quais o controle restaurativo. Este assunto será abordado nos capítulos subsequentes.

Por outro lado, este tipo de arquitetura de vários computadores interligados por rede local coloca uma série de problemas ou desafios potenciais, dos quais se destacam [15]:

- desenvolvimento de banco de dados distribuído, que permita a processos escritos em diferentes linguagens de programação e sob diferentes sistemas operacionais, trocarem informações em alguma forma padrão.
- desenvolvimento de interface homem-máquina padronizado, com utilização de terminais gráficos, e de recursos como "zoom", janelas, etc.
- desenvolvimento de software para comunicação e sincronização entre processos em um ambiente distribuído.

Finalmente, um sistema deste tipo produziria uma mudança funcional profunda no Centro de Supervisão e Controle, ao permitir o acesso aos dados de tempo real a setores da empresa que não têm atualmente acesso ao ambiente da sala de controle [15].

III. A Reconposição de Sistemas Elétricos de Potência

III.1 Introdução

O sistema elétrico se encontra no estado restaurativo após a ocorrência de distúrbios que provocaram desligamentos de equipamentos de transmissão e/ou de geração. Tais desligamentos por sua vez acarretaram rejeição de cargas ou perda de interligações com outras empresas, causando assim interrupções de serviço aos usuários.

Do ponto de vista de uma empresa de energia elétrica, tais usuários podem ser consumidores residenciais, comerciais ou industriais, ou ainda interligações contratadas com outras empresas co-participantes de um sistema interligado.

De acordo com a gravidade dos distúrbios, pode haver blecaute parcial ou total, com o desmembramento do sistema, ou mesmo, em uma situação extrema, o seu desligamento total.

Estes desligamentos têm um custo social e econômico elevado. Este custo é tanto maior quanto mais tempo se prolongar a interrupção de serviço.

Emergências podem surgir subitamente, ou serem construídas lentamente. Durante essas emergências, o despachante tenta manter o sistema sob controle, controlando o balanço entre geração e carga através de todos os meios possíveis. Há dois

fatores que podem conduzir estes esforços a falha [12]:

- restrições de tempo : inabilidade de responder suficientemente rápido.
- restrições de capacidade : incapacidade momentânea da geração, ou do sistema de transmissão, de suprir a demanda.

Distúrbios elétricos podem ter origem interna ou externa. Distúrbios de origem interna são causados por falhas de equipamentos sobrecarregados, ou desgastados devido a manutenção deficiente, ou ainda por atuação indevida de proteções. A ocorrência deste tipo de distúrbio pode ser evitada ou minimizada com manutenção adequada e operação segura. Distúrbios de origem externa, denominados faltas [1], podem ser causados por quedas de raios, temperaturas baixas, incêndios, queimadas, etc. Estes distúrbios, por serem imprevisíveis, não podem ser evitados [3].

A atual tecnologia permite que os sistemas elétricos sejam projetados e construídos para operar eficientemente, com alto nível de segurança [13,16]. Na maior parte do tempo os sistemas operam no estado normal. A ocorrência de distúrbios que coloquem os sistemas no estado restaurativo não é muito frequente. Os sistemas interligados atuais têm capacidade para suportar a maior parte das contingências [16].

No evento de uma perda de um equipamento de maior importância, com seus resultantes surtos de potência, o sistema deve ser capaz de absorver esse estresse sem posterior dano e de reencontrar um novo balanço de fluxos de energia. A coincidência de distúrbios, ou uma fraqueza escondida nos

componentes do sistema, ou mesmo nas funções de controle, podem se combinar para produzir estresses locais momentâneos além de qualquer nível de resistência, para o qual o sistema pudesse ser projetado dentro de razoáveis limites econômicos [12].

Em países como o Brasil, que por carência de recursos para investir no setor elétrico, têm seus sistemas elétricos operando com margens de segurança aquém do desejável, blecautes significativos tendem a ocorrer com maior frequência. A grande interconexão entre os sistemas elétricos das empresas de energia do país possibilita a ocorrência de blecautes de grandes proporções, que podem chegar a atingir regiões inteiras do país.

É raro que um distúrbio catastrófico retire o sistema de um estado aparentemente seguro para levá-lo a uma falha de grandes proporções. Usualmente, tais falhas são resultado de um nível reduzido de segurança, que torna o sistema vulnerável aos efeitos cumulativos de uma série de distúrbios moderados [12].

Assim, uma sequência de eventos menores pode resultar na remoção de um equipamento tal como uma linha de transmissão ou de uma unidade geradora. Esta sequência de eventos pode reduzir gradualmente o nível de segurança ou a robustez do sistema a uma extensão tal que mesmo uma contingência normal pode ser suficiente para causar uma falha drástica no sistema [12].

Um exemplo significativo desse tipo de ocorrência é o grave blecaute de Nova York, ocorrido em 13 de julho de 1977.

De acordo com a narração obtida na referência [12], o

sistema da concessionária Consolidated Edison experimentava uma situação muito típica, um pico de verão normal. A maior parte da geração estava localizada na seção norte da área de concessão, e uma potência considerável era importada do norte. Contudo, ao mesmo tempo, a área dentro do sistema da Con Edison estava sob severa tempestade. Sob estas circunstâncias, 2 linhas de 345 kv ligando Con Edison ao norte de Nova York foram atingidas por raios. Isto representa um distúrbio bastante severo, pois é uma contingência múltipla devido à perda de 2 linhas importantes. O sistema resistiu e se recuperou, mas a nova condição operativa foi estabelecida em nível de segurança consideravelmente mais baixo. O tempo na área de Nova York continuava ruim, e outra seção do sistema foi atingida por raios, resultando em operações de chaveamento que isolaram equipamento adicional. Sob circunstâncias normais, esta contingência não seria difícil de ser suportada, mas devido à extrema redução do nível de segurança do sistema, este distúrbio adicional causou um grande número de sobrecargas em linhas de transmissão, o que levou finalmente ao colapso total do sistema.

III.2 O Procedimento de Recomposição

O procedimento de recomposição de um sistema elétrico pode ser visto como o conjunto de ações tomadas com o objetivo de restabelecer o serviço aos usuários, no mais breve espaço de tempo possível.

São tomadas ações objetivando colocar o sistema novamente

no estado normal seguro, ou se isto não for possível, no estado alerta.

O problema da recomposição de um sistema elétrico após um colapso parcial ou total é quase tão antigo quanto a própria indústria de energia elétrica [16]. A princípio, os procedimentos de recomposição eram tomados com base quase que exclusivamente na experiência operativa do pessoal envolvido, proveniente de situações semelhantes ocorridas anteriormente.

Com o crescimento dos sistemas elétricos e a crescente interconexão com os sistemas vizinhos, a tarefa de recomposição de sistemas elétricos tornou-se cada vez mais complexa, e o tempo necessário à restauração do serviço cada vez mais longo [17].

A vasta gama de situações operativas distintas, associada à falta de familiaridade dos despachantes com muitas dessas situações, e com o agravante da premência de tempo, muitas vezes acarretava enormes dificuldades na recomposição, com muitas tentativas mal-sucedidas, e conseqüente prolongamento das situações de blecaute [17].

As empresas de energia elétrica passaram então a tentar minimizar estes problemas através da preparação prévia de planos de recomposição que abrangessem o maior espectro possível de situações. Tais planos são resultado de estudos elétricos "off-line", e atualmente são amplamente adotados, com variados graus de detalhamento e abrangência, pelas mais diversas empresas de energia elétrica [17].

No entanto, por mais completos que sejam, os planos de

recomposição nao prevêem todas as situações operativas, e portanto muitas vezes não fornecem orientação, deixando nestes casos ao despachante a total responsabilidade pelas decisões operativas tomadas no procedimento de recomposição do sistema.

Assim, o procedimento de recomposição depende bastante da experiência pessoal do despachante, do seu conhecimento das especificidades do sistema elétrico, de suas heurísticas e "sentimento" operativo, adquiridos ao longo de vários anos de experiência operativa.

Com exceção da supervisão em tempo real dos estados das chaves e disjuntores dos equipamentos, e das medições de grandezas elétricas tais como frequência, potências, tensões e correntes, os despachantes não contam com outros recursos computacionais em tempo real para auxiliá-los na recomposição do sistema elétrico.

Os programas de Análise de Redes Elétricas disponíveis normalmente nos Sistemas de Supervisão e Controle não são adequados para fornecer suporte à tomada de decisão, durante a recomposição.

Para agravar o quadro, durante situações graves, como a recomposição após blecaute total ou parcial do sistema, o despachante é sobrecarregado com um número excessivo de informações, como por exemplo, a enorme quantidade de alarmes gerados, que o confundem mais do que auxiliam na sua tomada de decisão [4].

A alta taxa de variação dos dados de tempo real causa, além do processamento excessivo de alarmes, um grande fluxo de

comunicação entre o COS e os CORs, ou entre COS e remotas. Esta sobrecarga computacional tem como consequência a degradação do tempo de resposta do sistema, justamente nos momentos em que é mais necessário ao despachante. Esta lentidão é sentida claramente pelo despachante no tempo de apresentação de telas nos CRTs coloridos, crucial para o despachante.

III.3 Reconposição Distribuída versus Centralizada

Historicamente, o procedimento de reconposição era conduzido inteiramente pelos COS das empresas. Os operadores das usinas e subestações se limitavam a executar as manobras necessárias para atender às instruções provenientes dos despachantes, que centralizavam todas as decisões e comandos. Qualquer manobra nas usinas e subestações era previamente autorizada pelo COS, e toda e qualquer ocorrência nas estações era reportada ao mesmo. A autonomia dos operadores era quase nenhuma [18].

Essa forma de reconposição, totalmente centralizada e sequencial, mostrou-se bastante inadequada com o crescimento dos sistemas elétricos e com o aumento na complexidade de operação dos mesmos. Os maiores inconvenientes eram o elevado fluxo de comunicação entre operadores e despachantes, a sobrecarga de trabalho no COS da empresa, e principalmente a excessiva demora no procedimento de reconposição [19].

Atualmente verifica-se uma ampla tendência à

descentralização do procedimento de recomposição [20]. Maior autonomia vem sendo dada aos operadores de subestações e usinas. Estes passam a agir segundo estratégias de recomposição previamente definidas, e consolidadas por instruções de operação específicas para recomposição de cada subestação ou usina. Tais instruções estabelecem uma sequência de procedimentos e manobras a serem efetuadas pelos operadores, limitando ao máximo as situações em que se faz necessária a comunicação com o COS.

O despachante se torna então o supervisor do procedimento de recomposição, só intervindo quando necessário [19].

Assim, o procedimento de recomposição atual para sistemas de médio e grande porte é distribuído e paralelo. Sistemas pequenos, com poucas fontes de suprimento, e preponderantemente radiais, podem ainda manter um procedimento centralizado e sequencial [16].

III.4 Os Planos de Recomposição

Os planos de recomposição são amplamente utilizados pelas empresas de energia elétrica, para a execução do procedimento de recomposição do sistema após distúrbios [16,17].

Esses planos são baseados em filosofias de operação e estratégias de recomposição da empresa, e visam promover a recomposição de forma ordenada e segura, o mais rápido possível, a partir de um colapso parcial ou total do sistema, de forma a minimizar o impacto nos consumidores [17].

Tais planos atendem às necessidades específicas de cada empresa, não podendo ser diretamente aplicados a outra empresa. No entanto, as estratégias e linhas gerais de ação são comuns a empresas de características semelhantes [17].

Os planos de recomposição são obtidos pela junção de estudos elétricos prévios efetuados pelo setor de planejamento de curto prazo da empresa, com a experiência operativa do setor de operação [21].

Os estudos elétricos são efetuados através de simulações computacionais "off-line" do comportamento do sistema elétrico tanto em estado estacionário como em regime transitório. O estado estacionário é modelado através de programas de fluxo de potência, enquanto o regime transitório é estudado através de programas de estabilidade dinâmica e de transitórios eletromagnéticos [22].

Os planos de recomposição são detalhados e traduzidos para uma linguagem operativa, tornando-se então instruções de operação para recomposição. Estas instruções devem ser precisas, claras, sem ambiguidades, e sua atualização deve ser constante. O pessoal de operação deve conhecê-las detalhadamente, e tê-las sempre disponíveis, para qualquer eventualidade [17,21].

O desenvolvimento de um glossário de termos preciso e consistente é essencial, sendo mais importante para a recomposição do que para a operação normal do dia a dia [17].

As instruções de operação para recomposição especificam sequências de ações sobre o sistema, condicionadas à satisfação de determinadas condições operativas. A inclusão de fluxogramas

que sintetizem as ações e condições é altamente recomendável.

Embora os planos de recomposição sejam específicos de cada empresa, a elaboração dos mesmos segue em geral as seguintes etapas [17,21]:

- determinação de características do sistema relevantes para a recomposição; estas características podem ser grupadas em três grupos funcionais : balanço de potência reativa e tensão, balanço carga-geração, e características associadas a equipamentos de medição e proteção.
- desenvolvimento de estratégia de recomposição, definindo-se etapas distintas de recomposição, cada etapa formada por um conjunto de tarefas, e cada tarefa por sua vez constituída por uma série de ações.
- estabelecimento de linhas gerais de ação, de forma a permitir uma rápida recomposição do sistema.
- simulação dos efeitos das ações, para verificar se as condições operativas resultantes são satisfatórias, e evitar a ocorrência de novos desligamentos, devido a estas ações.
- alocação de recursos e coordenação de atividades para assegurar a factibilidade da sequência de ações propostas.
- preparação de instruções detalhadas, e distribuição ao pessoal de operação.

III.5 Estratégias de Reconposição e Linhas Gerais de Ação

Após um blecaute, é necessário determinar o estado e a topologia do sistema elétrico, de modo a iniciar o procedimento de reconposição a partir do nível apropriado [17]. Isso é feito atualmente no Centro de Operação do Sistema, através do levantamento dos estados das chaves e disjuntores dos equipamentos do sistema em colapso [16].

A estratégia básica de reconposição adotada atualmente pode ser resumida nas seguintes etapas [13,17,21]:

- seccionalização do sistema em subsistemas isolados pré-definidos.
- reconposição simultânea de cada subsistema.
- sincronização entre os subsistemas.
- finalização da reconposição.

O objetivo principal desta estratégia é tornar o mais rápido possível o procedimento de reconposição, através da simultaneidade de ações sobre o sistema.

A seguir são descritas as linhas gerais de ação para cada uma dessas etapas.

III.5.1 Seccionalização do Sistema

A primeira etapa na recomposição consiste na seccionalização do sistema em subsistemas eletricamente isolados. Tais subsistemas são também denominados ilhas ou áreas elétricas.

Isto é feito através da abertura dos disjuntores que conectam essas ilhas. Essas manobras são executadas por atuação manual de operadores das usinas e subestações, ou por controle supervisão remoto, através de esquemas automáticos de ilhamento.

Essas ilhas são definidas previamente pelos estudos que elaboram o plano de recomposição. Esses estudos levam em consideração os seguintes critérios para a seccionalização em subsistemas [16] :

- cada subsistema deve ter capacidade de geração de auto-restabelecimento para recompor os equipamentos críticos.
- cada subsistema deve ter capacidade de balancear geração e carga dentro dos limites de frequência especificados.
- cada subsistema deve ter recursos de controle de tensão suficientes para manter um perfil de tensão apropriado.
- cada subsistema deve ter recursos para ser suficientemente monitorado no centro de controle da empresa.
- todos os pontos de interligação entre os subsistemas devem ser capazes de promover a sincronização entre os mesmos.

III.5.2 Recomposição Simultânea dos Subsistemas

A etapa seguinte, de recomposição simultânea de cada subsistema, corresponde à etapa mais crítica na recomposição.

Para empresas com geração própria, esta etapa começa pela partida das unidades geradoras das usinas do subsistema. Esta tarefa se torna mais complexa de acordo com as características do parque gerador da empresa, se predominantemente termo ou hidrelétrico [16].

As primeiras unidades geradoras a serem recolocadas em operação são as pertencentes a usinas cujos serviços auxiliares independem de alimentação externa para colocar as unidades em funcionamento. Estas usinas são denominadas usinas de auto-restabelecimento.

A partir daí, é dada prioridade à alimentação dos serviços auxiliares das usinas próximas que não tenham capacidade de se restabelecerem isoladamente. Assim, são energizadas as linhas e transformadores que alimentam essas usinas, de modo que estas possam ser também recolocadas em operação.

A partida de unidades térmicas é em geral mais crítica, devido ao curto prazo de tempo de algumas dessas unidades para a retomada de operação. Transcorrido esse intervalo de tempo, essas unidades se tornam indisponíveis por muitas horas, até que o procedimento de partida fria possa ser iniciado. A partida

quente para usinas térmicas sem capacidade de se auto-restabelecerem ainda é mais crítica, pois ainda leva em conta o tempo necessário para que seus serviços auxiliares sejam supridos por outra estação [16].

Nesta fase inicial de partida das usinas, a tomada de carga é feita de preferência localmente a estas usinas, e apenas para trazer as unidades geradoras para seus níveis mínimos de geração estável, e para manter condições de tensão satisfatórias [16].

A partir daí, a tomada de cargas mais prioritárias e o aumento da capacidade de transmissão do subsistema podem ser efetuados.

As tomadas de carga são feitas em geral em pequenos incrementos, devido ao balanço de carga e geração. Isto prolonga a recomposição, mas evita o declínio acentuado de frequência que poderia ocorrer, caso os incrementos fossem maiores [21]. Em geral, toma-se carga quando a frequência se apresenta alta, e aumenta-se a geração quando a frequência se torna baixa [17].

O aumento na capacidade de transmissão do subsistema é necessário para fazer frente ao incremento dos níveis de carga e geração. No início dessa fase, o sistema se encontra disposto radialmente. Assim, entre duas estações quaisquer, só há um caminho elétrico. A criação de um caminho alternativo entre estas duas estações, formando uma malha, é denominada fechamento de anel. O procedimento de fechamento de anel pode causar novos distúrbios quando a diferença entre os ângulos de fase nos terminais do disjuntor onde se processará é muito elevada.

Nesta etapa, precauções são tomadas na energização de linhas em vazio, para não comprometer o balanço de potência reativa do subsistema. Pelo mesmo motivo, para todo conjunto de circuitos paralelos, apenas um é energizado inicialmente. Os outros só são energizados após o primeiro estar transmitindo potência ativa.

III.5.3 Sincronização entre os Subsistemas

Ao final da etapa anterior os subsistemas estão operando de forma segura, com frequências distintas, embora próximas da frequência nominal.

A etapa de sincronização entre os subsistemas objetiva retomar a operação do sistema de forma integrada, sem ilhamentos. Isto é efetuado através do restabelecimento da conexão elétrica entre cada par de subsistemas.

O procedimento de restabelecimento da conexão entre dois subsistemas de frequências distintas é denominado fechamento de paralelo, e é efetuado pela energização de um circuito que interligue as duas ilhas, conectando-as e sincronizando suas frequências.

III.5.4 Finalização da Recomposição

A etapa de finalização da recomposição corresponde ao conjunto de ações necessárias para retomar a operação normal do sistema elétrico como um todo.

Esta etapa pode incluir tomadas de cargas ainda não atendidas, fechamento de novos anéis, normalização das interligações com sistemas de empresas vizinhas, aumento de geração, e medidas para controle de tensão.

A normalização das interligações com outras empresas nesta etapa depende da filosofia da empresa em relação a iniciar sua recomposição isolada das empresas vizinhas ou com assistência externa [17].

A última ação nesta fase de finalização é restabelecer o controle carga-frequência.

III.6 Uma Filosofia Moderna de Recomposição Distribuída

Acompanhando a tendência mundial de descentralização do procedimento de recomposição, as principais empresas de energia elétrica brasileiras vêm alterando radicalmente sua filosofia de recomposição.

As empresas brasileiras de energia elétrica tinham procedimentos de recomposição bastante centralizados nos seus COS. Havia também incompatibilidades entre os procedimentos de

recomposição de empresas vizinhas e interligadas, o que provocava impasses ou desacertos na recomposição após grandes blecautes.

Uma moderna filosofia de recomposição distribuída e paralela vem sendo implantada nessas empresas, sob a coordenação do Grupo de Trabalho de Estudos de Operação, do GCOI [18,19,23,24,25].

O GCOI, Grupo Coordenador para a Operação Interligada, composto pela Eletrobrás e por empresas controladas e subsidiárias, vem procurando consolidar e compatibilizar, a nível de planejamento e programação, a operação das várias empresas de energia elétrica como a operação conjunta de um sistema interligado, o sistema interligado brasileiro, na realidade formado por dois grandes sistemas, o sistema interligado Sudeste-Sul, e o sistema interligado Norte-Nordeste.

Esta filosofia tem dois objetivos fundamentais:

- promover a recomposição distribuída internamente a cada empresa participante do sistema interligado.
- promover a recomposição integrada entre as empresas, ou seja, a recomposição das empresas como parte de um sistema interligado.

Esta filosofia de recomposição subdivide o procedimento de recomposição em duas fases distintas: recomposição fluente, e recomposição coordenada.

A fase de recomposição fluente é a fase inicial de

recomposição, e consiste na recomposição de áreas elétricas previamente definidas, com compatibilização carga/geração e configuração mínima.

Esta fase consiste basicamente na partida e sincronização de um número mínimo de unidades geradoras das usinas de auto-restabelecimento, e na energização dos circuitos de transmissão e transformadores necessários à alimentação das cargas prioritárias.

Esta fase será executada pelos operadores de usinas e subestações, através de instruções de operação específicas para recomposição de sua estação, com um mínimo de comunicação ou interferência dos COS das empresas.

Os despachantes dos COS apenas supervisionarão a fase fluente, interferindo somente no caso de impedimentos ou dificuldades não previstos, motivados por exemplo pela indisponibilidade de algum elemento da rede preferencial de restabelecimento.

Os operadores das subestações e usinas terão autonomia para efetuar todas as manobras necessárias para cumprir o plano de recomposição previsto para sua estação, e especificado na instrução de operação específica para recomposição da estação.

A fase de recomposição coordenada é a fase final do procedimento de recomposição, e consiste na liberação da tomada de cargas adicionais, no fechamento de anéis, no fechamento de paralelos entre os subsistemas, e na retomada do controle de frequência.

Esta fase é coordenada pelos Centros de Operação das empresas. Cabe aos despachantes assumir a responsabilidade pela recomposição e enviar as instruções aos operadores das estações, que executarão as manobras e controles necessários.

Para por em prática esta filosofia de recomposição, são então necessárias as seguintes medidas:

- definição de um plano geral de recomposição para o sistema interligado, com a definição de um conjunto de subsistemas ou áreas em que será seccionalizado o sistema interligado, para a fase fluente.
- detalhamento do procedimento de recomposição fluente de cada área, e confecção de instruções de operação correspondentes. As áreas elétricas terão um procedimento preferencial para recomposição. Quando possível, alternativas devem ser previstas para cobrir situações de indisponibilidade ou impedimento no procedimento preferencial [23].
- detalhamento do procedimento de recomposição fluente de cada usina ou subestação, com a confecção de instruções de operação para recomposição fluente da estação, que serão utilizadas pelos operadores com o maior grau possível de autonomia em relação ao COS.
- detalhamento do procedimento de recomposição coordenada, e confecção de instrução de operação, a ser utilizada pelos despachantes do COS nesta fase.

Mais detalhadamente, as atribuições dos despachantes do COS serão as seguintes [24,25] :

- preparar a subestação ou usina para o recebimento de tensão, efetuando manobras do tipo manter aberto ou abrir, e/ou manter fechado ou fechar os disjuntores.
- atender às condições de energização de equipamentos e circuitos.
- efetuar manobras de restabelecimento da estação, do tipo religar ou sincronizar, que foram atribuídas à recomposição fluente.
- alimentar a carga prioritária até o limite estabelecido.
- verificar condições de sincronismo para fechamento de anel ou paralelo, quando autorizados a isso.
- controlar a tensão e manter a frequência o mais próximo da frequência nominal, na fase fluente, para compatibilizar as tomadas de carga com a geração disponível nesta fase.
- aguardar solicitação e instruções do COS para continuidade e conclusão do restabelecimento na fase coordenada.

As atribuições dos despachantes do COS serão as seguintes [24,25] :

- determinar a extensão da ocorrência, verificando a configuração resultante.
- supervisão geral do processo de restabelecimento principalmente no que se refere ao controle de tensão e

tomada de carga adicional.

- efetuar o controle de frequência ou tensão do sistema na fase coordenada.
- coordenar fechamento de paralelo ou anel quando for o caso.
- liberar tomada de carga adicional, em função da disponibilidade de geração e transmissão.
- interferir na recomposição fluente quando detetar alguma anormalidade ou quando solicitado pelo operador da estação.

Como consequências esperadas da implantação desta nova filosofia de recomposição distribuída, podem ser citadas [24]:

- transferência de responsabilidade aos operadores das usinas e subestações, que passam a desempenhar um papel fundamental no procedimento. Deles dependerá o sucesso da estratégia.
- o trabalho do despachante ficará enormemente facilitado. Com a apreciável redução no fluxo de comunicações entre as estações e o COS, é minimizado o risco de estrangulamento das mesmas, além de permitir que os despachantes se dediquem à tarefa de supervisionar as ações dos operadores das estações durante a fase fluente, atuando apenas nas situações onde houver necessidade de sua interferência direta.

Atualmente, a nova filosofia de recomposição encontra-se em fase de implantação para o sistema interligado Sudeste-Sul. Está sendo definido o plano geral de recomposição do sistema, a

partir da premissa de um blecaute total. Paralelamente, estão sendo revistos, segundo a nova filosofia e o plano geral, os planos de recomposição de cada empresa integrante do sistema interligado. A etapa seguinte será a revisão detalhada das instruções de operação para recomposição de cada estação dessas empresas.

Um novo impacto na recomposição do sistema elétrico brasileiro se dará com a entrada em operação do CNOS - Centro Nacional de Operação do Sistema, que deverá a partir de 1993 efetuar a supervisão geral do procedimento de recomposição do sistema interligado brasileiro.

Um exemplo da aplicação desta filosofia à recomposição de um sistema elétrico é descrito no capítulo VI, onde é apresentada uma área elétrica para recomposição fluente, e a instrução de operação para a recomposição fluente da área é descrita.

IV. Sistemas Especialistas na Operação de Sistemas Elétricos de Potência

IV.1 Introdução

A Inteligência Artificial pode ser definida como o ramo da Informática que se dedica à simulação das habilidades humanas para a resolução de problemas [26].

A IA procura entender como os seres humanos pensam, para poder modelar e simular em computadores as habilidades cognitivas humanas, e assim construir sistemas que exibam um comportamento que possa ser considerado "inteligente" [26].

Segundo Rich [27], Inteligência Artificial é o estudo de como fazer computadores realizarem tarefas para as quais, no momento, seres humanos são melhores. Esta definição, embora efêmera, estabelece um escopo para a área de atuação da IA.

O desempenho dos computadores no processamento numérico é claramente superior ao dos seres humanos. Se determinado problema tem uma formulação matemática bem definida, e tem uma solução algorítmica clara, a programação numérica convencional deve ser utilizada. A razão principal porque técnicas de IA são empregadas em determinado problema é frequentemente não haver um algoritmo para sua solução que possa ser bem formulado [26].

Uma das premissas básicas da IA é a constatação de que para construir qualquer tipo de sistema inteligente, é necessário

conhecimento [26,27]. Intuitivamente, conhecimento pode ser definido como o conjunto de verdades, proposições e especulações, disponíveis em uma particular área de aplicação, denominada domínio. Esse conhecimento pode ser representado de várias formas, tais como expressões matemáticas, frases, procedimentos, regras, etc. [28].

Outra premissa fundamental da IA é que a representação e manipulação de conhecimento pode ser efetivamente realizada através do Processamento Simbólico, em lugar do processamento numérico dos sistemas tradicionais.

Uma das áreas de atuação da Inteligência Artificial é a resolução de tarefas específicas de um campo de conhecimento, para as quais é necessário um especialista, com habilidade ou treinamento naquele campo [26].

Esses sistemas para resolução de problemas em campos especializados de conhecimento, tais como diagnose médica, análise química, projetos de engenharia, etc., foram denominados Sistemas Especialistas [27].

Sistemas Especialistas são tradicionalmente definidos como programas computacionais que modelam o conhecimento e emulam o processo de raciocínio de um especialista humano na resolução de um problema específico de um determinado domínio [29,30,31].

Os Sistemas Especialistas têm potencial para resolver uma extensa variedade de problemas que requerem conhecimento sobre o problema, ao invés de uma aproximação puramente analítica [29].

Cada sistema especialista tem conhecimento em um domínio particular, e é capaz de resolver problemas que requerem aquele conhecimento [32].

O objetivo inicial dos Sistemas Especialistas era o de apresentarem desempenho igual ou mesmo superior ao desempenho individual dos especialistas humanos [33].

Isto só é viável atualmente para problemas em domínios restritos, onde o conhecimento de um ou mais especialistas pode ser capturado e codificado de forma exaustiva, compensando então o alto custo de desenvolvimento desses sistemas [33].

Atualmente, há uma tendência crescente de se utilizarem sistemas especialistas para substituir a perícia humana, em situações onde esta perícia é cara ou em grande parte do tempo indisponível [34].

Mais modernamente, uma nova utilização vem sendo amplamente adotada. Estão sendo desenvolvidos sistemas especialistas, não para substituírem os especialistas humanos, mas para os auxiliarem na execução de suas tarefas [32].

Assim, o objetivo desses sistemas não é apresentar um desempenho equivalente ou mesmo superior ao do especialista humano, mas o de servir como um assistente ou consultor inteligente em processos complexos ou exaustivos de tomada de decisão [35]. Sua função seria a de listar as alternativas viáveis ou promissoras, interagindo com o usuário quando necessário, mas deixando para este o julgamento final [36].

Neste sentido, alguns autores preferem denominar sistemas

projetados com tal objetivo de "sistemas baseados em conhecimentos", ou simplesmente de "sistemas de conhecimentos" [32,35].

Dois tipos de profissionais estão envolvidos no projeto e desenvolvimento de um Sistema Especialista: o especialista no domínio e o engenheiro de Conhecimento [37].

Um especialista é alguém que alcançou um grau de mestria em algum domínio, através de uma longa experiência e do desenvolvimento de procedimentos especialmente adequados à resolução de problemas desse domínio [33,38].

Engenheiro do Conhecimento é a denominação dada ao profissional que projeta Sistemas Especialistas. Cabe a ele observar, conversar e trabalhar com o especialista humano para determinar como expressar o processo de raciocínio do especialista numa forma objetiva [34].

IV.2 Conceitos Fundamentais sobre Sistemas Especialistas

IV.2.1 Características Básicas

Os Sistemas Especialistas procuram utilizar técnicas de raciocínio natural para a resolução de problemas, especialmente as técnicas de raciocínio de especialistas humanos [33,38].

Um especialista humano, ao se deparar com determinado

problema de sua área, utiliza uma série de regras práticas, provenientes de anos de experiência, de seu bom-senso, intuição ou "sentimento" sobre o problema. Estas regras práticas, denominadas heurísticas, evitam que o especialista considere todas as alternativas possíveis para se chegar à solução do problema. São essas heurísticas que permitem que os especialistas resolvam problemas muito mais efetivamente que novatos.

Um problema pode em geral ser modelado por um espaço de estados [27], e associado graficamente a um grafo de estados, ou a uma árvore de decisões [39]. O processo de solução do problema pode ser visto então como a tentativa de se "navegar" a partir do estado inicial, através dos estados intermediários, até se chegar a um estado final, que atenda às condições para ser solução do problema.

Para se navegar por grafos de estados, foram desenvolvidos uma série de métodos de busca. Estes métodos se dividem em dois grupos : métodos não informados e métodos informados.

Os métodos não informados, tais como o "backtracking", a busca em profundidade, ou em largura, não utilizam informações características do problema particular que se propõem a resolver, para percorrer o espaço de estados. Assim, a procura é "cega", exaustiva, e fica sujeita a uma explosão combinatória que pode inviabilizar a solução [39].

Os métodos informados utilizam heurísticas para podar a árvore de busca, e por isso realizam uma busca mais "inteligente", não estando tão sujeitos à explosão combinatória

[40].

Sistemas convencionais têm grande dificuldade em incorporar heurísticas, e utilizam em geral os métodos não informados. Já os sistemas especialistas incorporam facilmente heurísticas ao seu conhecimento, e esta característica constitui um forte motivo para o sucesso que os sistemas especialistas vêm alcançando, principalmente para problemas em domínio restrito [26].

Uma característica importante dos seres humanos é a capacidade de lidar com conhecimento inexato ou incompleto. Assim, os sistemas especialistas também devem ser capazes de lidar com os erros e incertezas advindos dos dados do mundo real.

Uma outra característica dos seres humanos é a capacidade de estabelecer generalizações. Assim, os sistemas especialistas devem ser capazes de agrupar situações que compartilhem propriedades comuns [27].

Finalmente, os seres humanos têm capacidade de explicar porque adotaram uma determinada linha de ação. Esta capacidade vêm sendo incorporada de uma forma muito simplificada aos sistemas especialistas, e em geral não passa do rastreamento do procedimento utilizado para chegar à solução, em vez de explicações teóricas mais profundas.

Mesmo estas explicações superficiais podem ser de grande ajuda para o usuário, quando este tiver que decidir se aceita ou não a solução gerada pelo programa.

Com a incorporação destas características aos sistemas especialistas atuais, estes compartilham algumas propriedades com especialistas humanos [33,38] :

- podem fornecer alto desempenho em domínios restritos.
- podem lidar com erros e lacunas nos dados fornecidos.
- podem evitar passar muito tempo investigando falsas hipóteses.
- podem fornecer alguma explicação sobre seu processo de raciocínio.

IV.2.2 Representação do Conhecimento

O especialista humano trata um problema de forma parcialmente subjetiva, enquanto o computador pode somente trabalhar com representações objetivas [34].

O maior problema no projeto de um sistema especialista é justamente abstrair o conhecimento de um especialista e colocá-lo numa forma objetiva conveniente [34].

Um sistema especialista necessita que o conhecimento sobre o domínio seja formalizado, através por exemplo, da codificação em regras [33,38].

Existem diversas formas de representação do conhecimento. Algumas das mais conhecidas são Redes Semânticas, Triades objeto-atributo-valor, Regras de Produção, Lógica "Fuzzy",

Cálculo de Predicados, Cálculo Proposicional, e Sistemas de Objetos, dentre os quais se destacam os quadros ("frames") e os "scripts". As referências [27,41,42] descrevem em detalhe estas formas de representação.

Duas formas de representação se destacam na área de Sistemas Especialistas: as regras de produção e os Sistemas de Objetos baseados em quadros [34].

Sistemas Especialistas que adotam a representação de conhecimento com base em regras de produção são denominados "sistemas de produção", ou "sistemas especialistas baseados em regras" [34]. Tais sistemas são os mais comuns atualmente.

No Sistema de Produção, o conhecimento é armazenado na forma de fatos e regras.

Fatos são afirmações cuja validade se aceita. Na maioria dos sistemas especialistas, um fato consiste de um atributo e um valor específico associado [42].

Regras de produção expressam relacionamentos entre fatos, e constituem um par condição-ação da forma [33,34]:

SE (c_1, c_2, \dots, c_N) ENTÃO (a_1, a_2, \dots, a_M) ,

onde a_1, a_2, \dots, a_M são as ações a serem efetuadas

se as condições c_1, c_2, \dots, c_N são satisfeitas.

Muitos processos intelectuais e fenômenos físicos podem ser modelados por um conjunto de regras [33].

IV.2.3 Estratégias de Inferência e Controle

Os Sistemas Especialistas têm a capacidade de inferir novos conhecimentos, a partir dos conhecimentos originais.

Inferência é o processo pelo qual se derivam novos fatos de fatos conhecidos. Uma estratégia ou regra de inferência aplicada a fatos conhecidos e a uma regra resulta em um novo fato. A estratégia ou regra de inferência mais comum empregada nos sistemas de produção é a implicação tautológica denominada "modus ponens", que pode ser denotada por [41,42]:

$$(p \wedge (p \Rightarrow q)) \Rightarrow q$$

Esta tautologia afirma que se p é verdadeiro, e se existe uma regra que diz que Se p Então q, é válido concluir que Q é verdadeiro [42].

Um outro aspecto da inferência é a estratégia de controle, ou seja, a estratégia de encadeamento das regras de produção, que vem a ser o método empregado pelo mecanismo de inferência para reger a ordem em que se dá o raciocínio [42].

Duas estratégias de controle são normalmente utilizadas: o encadeamento regressivo, e o encadeamento progressivo.

O encadeamento regressivo opera a partir de hipóteses e busca sua comprovação encadeando as regras para trás. Este mecanismo emula o raciocínio em um processo de diagnóstico. Por exemplo, um médico coloca uma hipótese - existência de determinada enfermidade - e procura confirmar se os sintomas

associados à doença se manifestam [30].

O encadeamento regressivo é bem mais eficiente quando os resultados possíveis são conhecidos e são poucos. Sistemas com este tipo de encadeamento são denominados "sistemas conduzidos por objetivos" [42].

O encadeamento progressivo opera em sentido inverso, partindo de fatos conhecidos, e disparando as regras para se chegar eventualmente a uma conclusão [30].

Quando o objetivo ou solução precisa ser construído, ou o número de possíveis resultados é grande, a estratégia de encadeamento progressivo é mais eficiente. Sistemas com este tipo de encadeamento são denominados "sistemas conduzidos por dados" [42].

As estratégias de controle de inferência mais modernas sobre regras de produção combinam as duas técnicas de encadeamento. Realmente, um especialista - por exemplo, um médico que diagnostica uma enfermidade - na realidade não parte de qualquer hipótese, mas primeiro pergunta o que sente o paciente, para estabelecer alguns antecedentes (sintomas) que sirvam para estabelecer uma ou várias hipóteses (encadeamento progressivo). A partir daí, trata de comprová-las em determinada ordem (encadeamento regressivo) [30].

IV.2.4 Arquitetura Básica de um Sistema Especialista

Um Sistema Especialista baseado em regras é constituído dos seguintes elementos fundamentais: uma Base de Conhecimentos, um Motor de Inferência, e uma Interface Homem-Máquina [31,42].

A Base de Conhecimentos armazena todos os conhecimentos que podem ser obtidos de um ou mais especialistas humanos sobre o comportamento de um processo, fenómeno ou problema dado [30]. Cada conhecimento é armazenado na forma de fatos ou regras, e é virtualmente independente dos demais [31].

Tal representação baseada em regras permite a um sistema especialista aproximar um problema de uma maneira similar ao especialista humano [34].

O Motor de Inferência contém as estratégias de inferência e controle que um especialista utiliza para manipular os fatos e regras [42].

O Motor de Inferência é responsável pelo encadeamento dos conhecimentos isolados da Base de Conhecimentos, considerando-se as informações chaves do problema, de forma a exibir um comportamento semelhante ao raciocínio dedutivo, empregado pelos especialistas humanos para chegar à solução [31].

A Interface Homem-Máquina é responsável pela comunicação do usuário com o sistema, fornecendo ou solicitando informação [31].

A Base de Conhecimentos consiste de duas partes : uma

memória de dinâmica de trabalho e uma base estática de regras.

A base de regras consiste de fatos e regras que são compilados como parte do problema. Esta não se altera durante a execução do programa. A memória de trabalho, no início da execução do sistema especialista, está totalmente vazia. O motor de inferência, à medida que a execução prossegue, utiliza fatos e regras da base de regras, em conjunção com entradas do usuário, para adicionar fatos à memória de trabalho [34].

O motor de inferência tem duas funções : inferência e controle. Inferência é o processo básico de raciocínio formal. Envolve casamento de padrões ("matching"), e utiliza fatos conhecidos para derivar novos fatos por meio de regras. Em geral, a inferência opera através do "modus ponens" [34].

A função de controle determina a ordem em que as regras serão testadas, e o que acontece quando uma regra obtém sucesso ou falha. O motor de inferência toma os fatos reconhecidos como verdadeiros da base de regras e da memória de trabalho e os utiliza para testar as regras da base de dados estática através do processo de "matching". Quando uma regra é bem-sucedida, ela é disparada, e o conseqüente da regra é adicionado à memória de trabalho [34].

Em alguns casos, mais de uma regra pode "casar" com os fatos conhecidos. Então as funções de controle devem determinar qual regra disparar. Isto é denominado resolução de conflitos [34].

A função de controle é cíclica. Uma vez que uma regra

dispara e a conclusão é adicionada a memória de trabalho, o processo de "matching" começa novamente, e o ciclo é repetido [34].

Sistemas especialistas mais complexos podem ter componentes adicionais, tais como Interface de Linguagem Natural, Sistema de Aquisição de Conhecimentos e Sistema Explanatório [34].

Uma interface de linguagem natural melhora a comunicação do usuário com o sistema. Em vez do usuário entrar SIM ou NAO como resposta, ou selecionar opções em menus, ou ainda entrar o valor de um atributo, a interface de linguagem natural permite ao usuário se comunicar com o sistema especialista durante o processo de consulta utilizando a linguagem humana [34].

Um sistema explanatório permite ao usuário responder a uma pergunta com outra pergunta : POR QUE? O sistema responde com informações sobre o objetivo que ele está tentando provar e então auxilia o usuário a entender o processo de raciocínio do sistema [34].

A figura IV.1 apresenta os componentes de um sistema especialista tradicional em linha firme, e em tracejado os componentes adicionais, característicos do que seria um sistema especialista avançado.

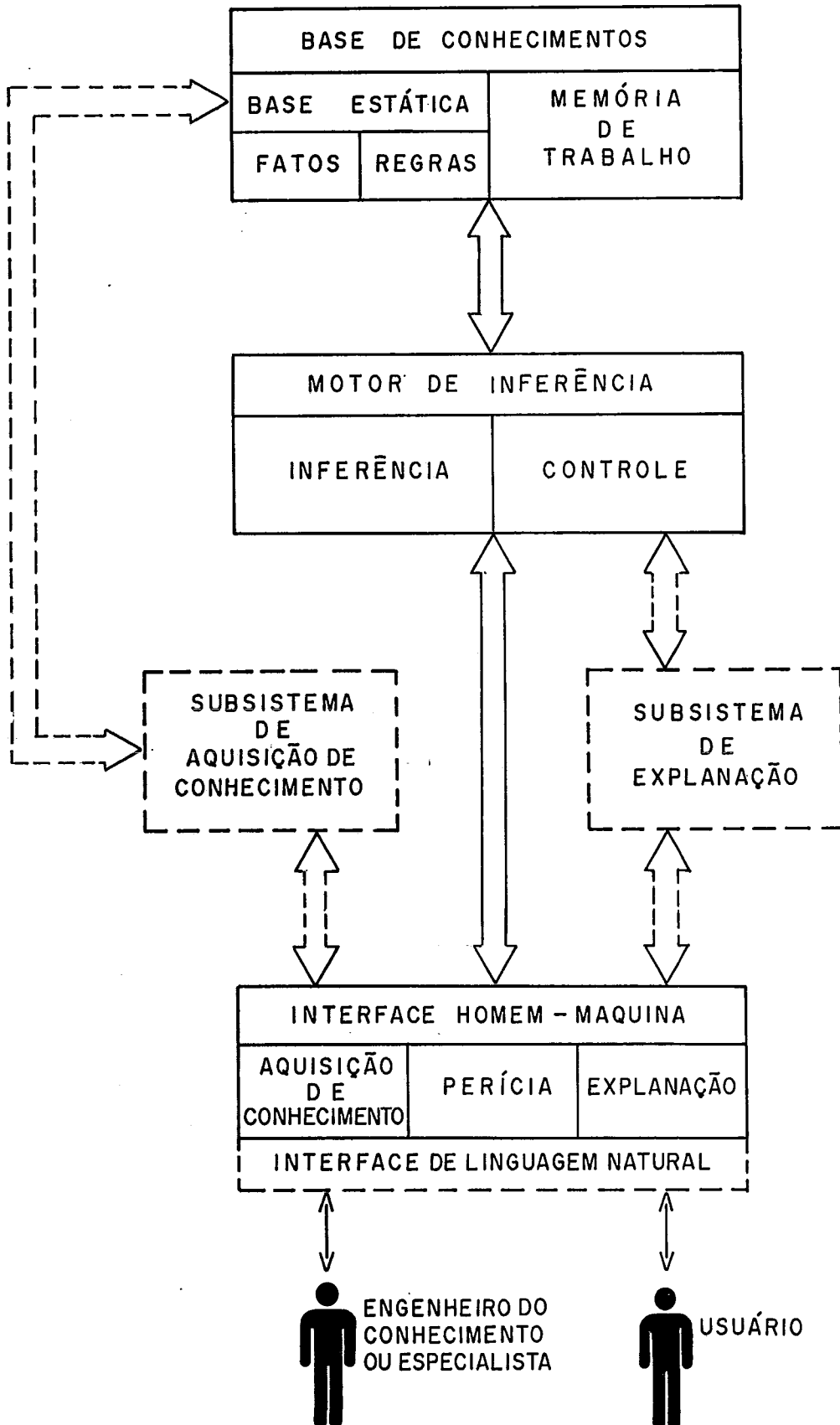


Fig. IV.1 . COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA ESPECIALISTA .

IV.2.5 Diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais

As diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais são bastante acentuadas. Para efeito didático, estão divididas neste texto em diferenças conceituais, funcionais e de projeto, embora na realidade estes aspectos estejam bastante interligados, não sendo possível em muitos casos fazer uma clara distinção entre eles.

IV.2.5.1 Diferenças Conceituais

A diferença conceitual básica entre a programação tradicional e a Inteligência Artificial é que a primeira implanta modelos quantitativos do mundo, enquanto a segunda implanta modelos qualitativos e empíricos [30].

Sistemas Especialistas são projetados para resolver problemas que requerem uma aproximação heurística, enquanto a programação convencional é melhor utilizada na resolução de problemas orientados numericamente [29].

Assim, a programação numérica ou algorítmica dos sistemas convencionais deve ser utilizada quando o problema é bem entendido, o conhecimento é estável e formalizado, e sua solução está claramente estruturada [43].

Neste caso as tarefas podem ser bem descritas por algoritmos, e dados suficientes e confiáveis estão disponíveis

para alcançar resultados definidos [44].

Já a programação simbólica dos Sistemas Especialistas é mais adequada quando a solução do problema inclui utilização de conhecimento subjetivo, fragmentado, resultante de julgamento ou heurístico, mais do que um conjunto de cálculos ou um algoritmo definido [43].

Neste caso, as tarefas são baseadas em grande número de regras SE-ENTÃO, e os dados podem ser incompletos ou inexatos. Os cálculos são utilizados apenas para dar suporte às decisões lógicas.

Como nos sistemas especialistas o aspecto heurístico é muito forte, e muitas vezes o resultado é correto somente dentro de uma certa probabilidade, a confiança nos resultados é alcançada através de um componente explanatório, que procura explicar como a perícia foi alcançada [44].

A referência [30] sintetiza através de uma regra um conjunto de critérios para determinar a conveniência de se empregar um sistema especialista para resolução de determinado problema:

SE o problema não tem uma formulação analítica, matemática ou algorítmica,

OU a solução analítica é incompleta,

OU não é factível seu processamento em computador em um tempo apropriado e com a memória disponível,

E para a solução do problema na prática se recorre a um

especialista ou se busca consenso de um grupo de indivíduos, ENTÃO deve-se considerar a possibilidade de se atacar o problema com um sistema especialista.

Um enfoque complementar para esta questão conceitual seria através do exame do espaço de estados para a solução de um problema.

Os métodos de solução de problemas podem ser classificados como algorítmicos ou dirigidos por dados [45].

Os métodos algorítmicos podem ser caracterizados por uma sequência de passos claramente definida, levando à solução com relativamente poucos e bem definidos ramos da árvore de decisão. O caminho para a solução depende fracamente dos dados que alimentam o problema, e em geral todos os ramos possíveis são conhecidos antes da implementação.

Os métodos algorítmicos de solução podem ser implementados com estruturas de controle fixas, independentes dos dados. Uma vez desenvolvidos, os algoritmos são estáticos, e implementações tendem a otimizar sua performance, ao invés de sua flexibilidade.

Métodos de solução conduzidos por dados tratam problemas onde os dados controlam fortemente os passos necessários para se encontrar a solução.

Problemas dirigidos por dados são baseados em conhecimentos. Tais problemas tipicamente crescem e mudam com o tempo, à medida que novo conhecimento é adicionado, ou conhecimento antigo é invalidado.

A árvore representativa de um problema desse tipo tem muitos ramos, com muitos caminhos alternativos para cada nó. Cada caminho representa a aplicação de algum conhecimento ao problema. Muitos ramos tornam-se conhecidos apenas durante a implementação.

Por essa razão problemas dirigidos por dados são difíceis de resolver com métodos algorítmicos diretos. Métodos para solução desses problemas tendem a enfatizar flexibilidade mais do que performance.

A linha divisória entre problemas algorítmicos e dirigidos por dados não é precisa. Problemas algorítmicos podem ter alguns ramos controlados por dados. Por outro lado, problemas dirigidos por dados têm algumas sequências fixas de passos. Na realidade, há um espectro de posições entre os dois extremos [45].

A figura IV.2 mostra árvores de decisão típicas para métodos algorítmicos e para métodos dirigidos por dados.

IV.2.5.2 Diferenças Funcionais

Do ponto de vista do usuário, as principais diferenças entre sistemas especialistas e sistemas tradicionais são [30] :

- flexibilidade : sistemas especialistas são adequados para resolver problemas mal-estruturados. A característica de rápida prototipação permite que sejam experimentadas frequentes alternativas e atualizações.

- alta performance: sistemas especialistas tentam implementar o grau de performance exibido por uma pessoa com reconhecida perícia no domínio do problema.
- entendimento : sistemas especialistas são capazes de explicar a linha de raciocínio adotada, o que é um elemento chave para aumentar a confiança do usuário.

Esta última característica permite que sistemas especialistas sejam ferramentas valiosas para treinamento, fornecendo uma forma sistemática de aprendizagem [46].

IV.2.5.3 Diferenças de Projeto

Do ponto de vista do projetista, a principal diferença baseia-se em que um programa tradicional, que também é um modelo de conhecimento, se desenvolve em uma linguagem de processo, ou seja, uma linguagem que interpreta a computação mediante um procedimento sequencial, uma instrução após a outra [30].

Um sistema especialista é construído como uma linguagem declarativa. As regras, como representação do conhecimento, são uma formulação explícita do conhecimento, e não são executadas numa ordem pré-estabelecida necessariamente [30].

Regras podem ser formuladas em quaisquer linguagens de programação, inclusive linguagens numéricas. A diferença entre linguagens numéricas e linguagens baseadas em regras é que no primeiro caso a estrutura é mais fechada, e no segundo mais aberta. No primeiro caso, a ordem em que as regras são

executadas é determinada pelo fluxograma do programa. A inserção de novas regras pode ser difícil e requer frequentemente grandes esforços de programação [33].

Numa linguagem baseada em regras, a ordem em que as regras são escritas tem pouco a ver com a ordem em que são executadas. De fato a ordem é dirigida por eventos ou dados [33].

Quando grande número de regras está envolvido, é muito mais fácil escrevê-las em linguagem baseada em regras do que numa linguagem numérica convencional [33].

Outra diferença básica é a independência entre código e dados dos Sistemas Especialistas.

Enquanto nos programas convencionais estes dois elementos estão muito ligados, nos Sistemas Especialistas existe uma independência entre a base de conhecimentos e o código de controle. Nos sistemas especialistas cada conhecimento é uma entidade isolada, que se comunica com outras dependendo das entradas do usuário. Assim, o sistema se comporta de forma diferente, de acordo com as respostas do usuário durante a consulta.

Esta independência entre dados e código se manifesta no procedimento de modificação dos sistemas, resultante do aprendizado decorrente de sua utilização.

Enquanto para sistemas convencionais, os efeitos do aprendizado são alcançados pela modificação manual dos programas, nos sistemas especialistas estes efeitos são alcançados pela alteração, adição, eliminação de fatos e regras,

sem alterações no motor de inferência [44].

Outra diferença básica em termos de projeto é o modelo de desenvolvimento de software.

O modelo de desenvolvimento de software para sistemas convencionais é um modelo com sequência de passos razoavelmente rígida. As três fases de desenvolvimento são o projeto, a codificação, e a depuração ("debugging") [47].

Ao fim da fase de projeto, estão prontas especificações funcionais e técnicas, que definem o problema e descrevem completamente o algoritmo a ser utilizado. A partir daí, se o projeto foi bem executado, as fases de codificação e depuração têm fraca realimentação com a fase de projeto.

A aplicação deste modelo ao desenvolvimento de aplicações de IA não leva em geral a bons resultados. Como o problema que se quer resolver é mal-estruturado, é difícil se chegar a uma descrição completa de um algoritmo, pois o mesmo não pode ser descrito de forma compacta. Isto implica em especificações incompletas, código incorreto, e frequentes modificações à medida que o projeto torna-se mais claro.

O modelo adotado para o desenvolvimento de software de IA é um modelo com as mesmas três fases, mas com um sequenciamento menos rígido, permitindo uma realimentação bem maior entre elas [47].

A saída da fase de projeto não é um conjunto de especificações, mas uma base de conhecimentos. O objetivo dessa

fase passa a ser não a produção de documentos, mas prototipar uma solução para o problema tão rápido quanto possível [47].

Assim, a maior parte do desenvolvimento em IA é caracterizada pela "prototipação rápida", em que somente esboços de especificação são desenvolvidos, e o programador confia no fato que idéias podem ser experimentadas rapidamente, para completar o projeto [37].

A figura IV.3 ilustra estes modelos de desenvolvimento de software.

IV.3 Sistemas Especialistas para Resolução de Problemas de Sistemas de Potência

Uma série de sistemas especialistas vêm sendo propostos na área de Sistemas de Potência. A referência [29] cita aplicações para sistemas de potência, relacionadas a projeto, controle, instrução, planejamento, diagnóstico, interpretação e monitoração.

O planejamento e a operação de sistemas elétricos de potência são as áreas de aplicação em sistemas de potência que vêm sendo objeto de intensa pesquisa e desenvolvimento em relação a sistemas especialistas.

As referências [35,48,49] tratam especificamente de sistemas especialistas para planejamento de expansão a longo prazo de sistemas elétricos.

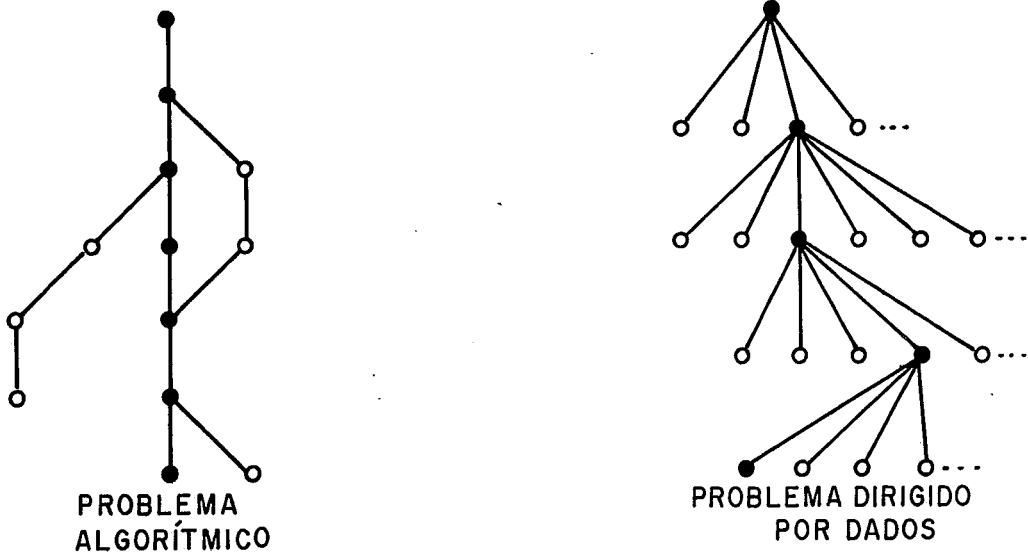


Fig. IV. 2 ÁRVORES DE DECISÃO TÍPICAS PARA MÉTODOS ALGORÍTMICOS E DIRIGIDOS POR DADOS.

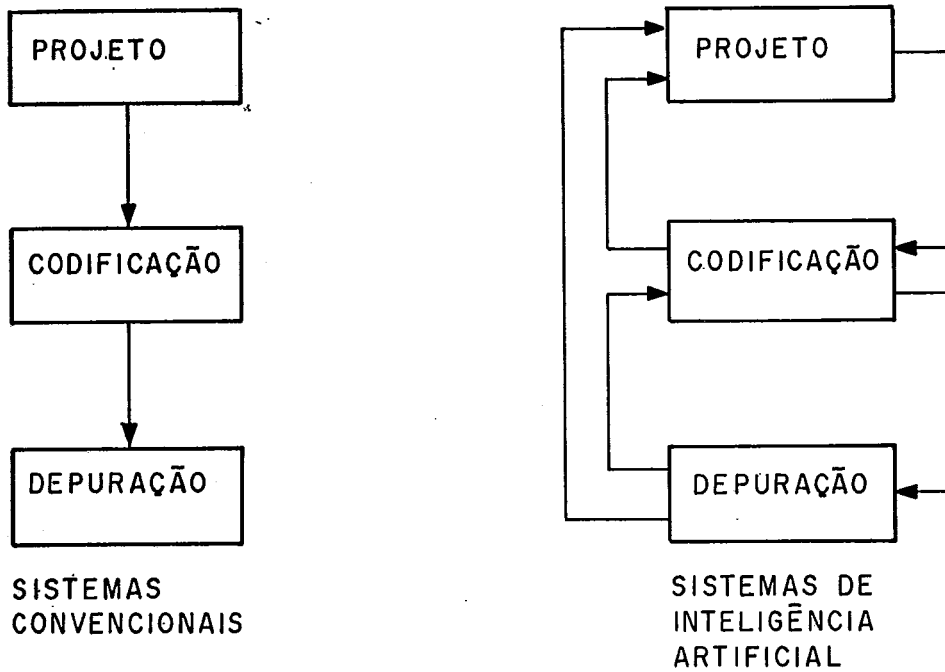


Fig. IV. 3 MODELOS PARA DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

A referência [50] apresenta uma pesquisa bibliográfica completa sobre os artigos publicados sobre sistemas especialistas para sistemas elétricos de potência, a partir de 1982.

A utilização de sistemas especialistas para Sistemas de Potência apresenta uma série de características próprias, além das características gerais desta tecnologia de IA. A seguir, estes aspectos são discutidos do ponto de vista conceitual e funcional.

IV.3.1 Aspectos Conceituais

A metodologia de solução de problemas de Sistemas de Potência tem sido baseada essencialmente em métodos numéricos, tais como programação matemática, otimização em multicritério, simulação, etc. [28].

Este enfoque puramente numérico tem seu emprego limitado para uso geral, sendo suas principais limitações [28,43] :

- a modelagem e a solução do problema se processa num único nível de abstração.
- dificuldade de garantir que o problema é bem formulado.
- dificuldade de incorporação e tratamento pelo método numérico de variáveis subjetivas, não quantificáveis.

- dificuldade de se introduzirem métodos heurísticos não triviais, empregando-se linguagens numéricas de programação.

A modelagem e a solução de problemas num único nível de abstração se contrapõem ao método de resolução de problemas utilizado pelos seres humanos. Quando nos confrontamos com um problema, procuramos inicialmente decompô-lo em vários problemas de menor complexidade. Resolvemos então os subproblemas e integramos as suas soluções na solução do problema original [28].

A Inteligência Artificial utiliza como metodologia corriqueira a resolução de problemas em vários níveis de abstração [28].

Muitos problemas complexos podem ser decompostos em vários subproblemas com variados níveis de abstração. Alguns desses subproblemas podem ser formulados de maneira consistente para uma abordagem numérica, enquanto que outros exigiriam uma abordagem mais aproximativa, ou de julgamento, própria para o processamento simbólico [43].

Em relação à incorporação de variáveis não quantificáveis, sua manipulação por métodos puramente numéricos é ineficiente. Variáveis como "estabilidade do sistema elétrico", "risco de investimento", não possuem uma métrica precisa de quantificação, apesar de terem seus significados facilmente intuídos.

O processamento simbólico exige o emprego de linguagens próprias com alto grau de abstração de dados, adequado para a manipulação de variáveis não quantificáveis (por exemplo, o "grau de segurança corrente de operação"). Isto decorre da

dificuldade de incorporação desse tipo de variável pelas linguagens convencionais. Linguagens simbólicas, como LISP e PROLOG, permitem a manipulação desse tipo de variável [28,43].

Quanto à utilização de heurísticas em modelos numéricos, seu emprego tem se limitado ao relaxamento de certas condições, a fim de aliviar o esforço computacional para se obter a solução do problema. Em IA, a quase totalidade dos mecanismos de resolução de problemas baseiam-se em heurísticas.

A integração de técnicas de programação simbólica com aplicações numéricas permite um aumento na tratabilidade dos problemas, pela habilidade de incorporação de heurísticas conhecidas e tratamento simbólico das variáveis em conjunto com a força dos programas algorítmicos, permitindo o emprego de vários níveis de abstração na resolução de problemas [43].

Sistemas Computacionais que integram técnicas simbólicas e programação numérica são denominados "sistemas computacionais híbridos". Problemas de Sistemas de Potência mais complexos poderão ser tratados em todos os seus aspectos através de sistemas deste tipo.

IV.3.2 Aspectos Funcionais

Sistemas Especialistas vêm sendo utilizados na área de Sistemas de Potência com as seguintes finalidades [31] :

- para consolidar e armazenar permanentemente um conhecimento especializado que de outra forma se perderia com o tempo, ou

com a saída de pessoal qualificado.

- para aliviar especialistas humanos de trabalho rotineiro.
- para instrução de pessoal com pouca experiência, uma vez que o sistema especialista pode explicar o raciocínio empregado para alcançar determinada solução.
- quando o conhecimento que se emprega tende a ser dinâmico, já que para os sistemas especialistas é relativamente simples enriquecer e/ou modificar a base de conhecimentos.
- quando a consulta a um especialista humano é muito custosa ou difícil de obter.
- quando existe experiência comprovada na área de conhecimento que se deseja atacar.

Dentre as maiores dificuldades para a resolução de problemas reais de sistemas de potência através de sistemas especialistas as seguintes merecem destaque [30] :

- dificuldades práticas na aquisição de conhecimentos e do processo de construção da base de conhecimentos. O processo de recolher perícia humana e convertê-la numa base de conhecimentos é um processo dispendioso e demorado [29,30].
- desconfiança dos usuários.
- existência em geral de fator custo-benefício pouco atrativo.
- as técnicas atuais de desenvolvimento de programas ainda

não estão maduras para o desenvolvimento de sistemas especialistas, o que dificulta bastante a transformação de protótipos em sistemas reais.

- a capacidade de memória dos computadores atuais e sua velocidade de processamento limitam as aplicações [31].

- a alta dimensionalidade intrínseca a muitos problemas de sistemas de potência é uma barreira potencial para desenvolver aplicações de sistemas especialistas [29].

IV.4 Sistemas Especialistas Aplicados à Operação de Sistemas Elétricos de Potência

IV.4.1 Objetivos da Incorporação de Sistemas Especialistas aos Centros de Supervisão e Controle

A função de um Sistema de Gerência de Energia é assegurar uma operação segura e econômica do sistema elétrico, assim como facilitar as tarefas rotineiras e constantes do pessoal de operação [47].

A operação dos sistemas elétricos é uma tarefa complexa, que requer combinação da experiência do despachante com o uso de avançadas ferramentas analíticas [51].

Fatores econômicos e sociais atuais requerem que sistemas de potência sejam operados atualmente mais próximos aos seus

limites do que eram inicialmente operados [52]. Os Sistemas de Gerência de Energia integram hardware e software avançado para fazer frente a esse quadro de progressiva complexidade operativa [47].

A operação de um sistema elétrico pode ser vista como um processo em tempo real de diagnóstico (entendimento da situação) e decisão (determinação de ações a serem efetuadas). Este processo requer despachantes experientes e capacitados 24 horas por dia [30,52], e envolve longos períodos de rotina, entremeados por crises ocasionais [47].

Nem sempre despachantes com o necessário grau de perícia estão presentes, atentos ou com a mesma agudeza mental. Isto pode ocasionar perda de segurança, qualidade ou eficiência [30].

A crescente complexidade operativa tende a promover alterações qualitativas na operação do sistema, requerendo um processo de diagnóstico e tomada de decisões mais rápido por parte do despachante [47].

Um Sistema de Gerência de Energia é projetado principalmente para utilização no estado normal do sistema elétrico. Funções como Estimação de Estado, Análise de Segurança, Fluxo de Potência Ótimo são utilizadas para assegurar a operação segura, enquanto funções como CAG, Despacho Econômico, e Previsão de Carga são utilizadas com o objetivo de obter a operação mais econômica [47].

Em geral, o despachante não sabe como utilizar

convenientemente os resultados desses programas de aplicação sofisticados [51].

Nos Sistemas de Gerência de Energia atuais a quantidade de dados aquisitados e a taxa de aquisição dos mesmos podem facilmente ultrapassar a capacidade cognitiva do despachante, o que ocorre rapidamente quando eventos súbitos e imprevistos acontecem [47].

Durante um evento imprevisto, ou uma falha de componentes importantes do sistema elétrico, um Sistema de Gerência de Energia serve principalmente para coleta de informações e emissão de relatórios, muitos dos quais só são úteis na análise pós-operação, como por exemplo o relatório de sequência de eventos [47].

Nessas situações, o sofisticado software de aplicação que funciona no estado normal torna-se de pouca ou nenhuma utilidade [47].

O despachante fica portanto desassistido para interpretar grandes quantidades de dados aquisitados e de alarmes gerados, e realizar processos complexos de raciocínio em um curto espaço de tempo e sob tremenda pressão psicológica [52].

Como essas tarefas têm que ser feitas em tempo real, os despachantes ficam expostos a um estresse mental elevado, o que torna o processo cognitivo bem diferente do experimentado em outras situações que não sejam de tempo real [47].

O processo de diagnóstico e decisão durante essas situações de emergência é portanto mal-estruturado, e sua solução baseia-

se pesadamente na experiência e na perícia dos operadores humanos em reagir corretamente [47].

A chave para a habilidade humana em tais situações repousa na experiência com eventos similares e com o uso de heurísticas para mapear situações complexas existentes em termos de eventos passados já assimilados, de forma a resolver os problemas do momento [47].

As informações que necessitam ser processadas e as decisões que têm que ser tomadas nesses períodos são frequentemente de natureza qualitativa, e não se ajustam aos métodos tradicionais da Ciência da Computação, tais como programação linear e não linear [52].

Como este quadro de aumento gradativo na complexidade de operação do sistema elétrico deverá continuar, há o iminente risco dos despachantes tornarem-se incapazes de gerenciar certas funções, principalmente no que se refere a tratamento de crises, a menos que sua capacidade cognitiva seja ampliada [47].

A introdução da Inteligência Artificial nos Sistemas de Gerência de Energia pode ser um passo significativo neste sentido, ao introduzir técnicas heurísticas no computador, abrindo caminho assim para muitas aplicações computacionais novas na operação de sistemas elétricos de potência [47].

A incorporação da Inteligência Artificial aos Sistemas de Gerência de Energia deve-se basicamente à crença que a melhor maneira de resolver problemas mal-estruturados na operação de sistemas elétricos é construir programas baseados em conhecimentos, que incorporem tanto o conhecimento superficial e

empírico dos despachantes como o conhecimento teórico e profundo dos engenheiros da Operação e da equipe de desenvolvimento de programas de aplicação [47,51].

Dentre as diversas motivações para a introdução de Sistemas Especialistas nos Sistemas de Gerência de Energia, as seguintes podem ser consideradas básicas :

- a necessidade de um processador inteligente de informações para auxiliar na coleta e interpretação de grandes volumes de dados [29].

- a necessidade de aliviar o despachante das muitas tarefas rotineiras e fragmentadas do seu dia a dia, permitindo que o mesmo dedique seu tempo a tarefas mais importantes, como a prevenção e o tratamento de crises [47,53].

- a necessidade de dar maior segurança ao despachante no processo de tomada de decisão, principalmente em situações de emergência.

- a necessidade de se incorporar heurísticas em muitas das funções efetuadas atualmente por grande programas de aplicação. Tais heurísticas podem ser utilizadas para relaxar restrições operativas complexas, difíceis de serem expressas matematicamente [47].

- a necessidade de fornecer uma interface consistente, amigável e inteligente entre os programas de aplicação e o despachante, de forma a orientá-lo na utilização dessas ferramentas [51].

A incorporação de sistemas especialistas aos Sistemas de Gerência de Energia para a Operação em tempo real dos sistemas elétricos proporcionaria duas grandes vantagens [52]:

- sistemas especialistas podem fornecer a pericia correta a qualquer hora do dia, a qualquer dia da semana.
- sistemas especialistas podem potencialmente fornecer uma reação rápida a eventos de emergência, sumarizando informações rapidamente, e checando muito mais regras aplicáveis do que um operador humano poderia fazer no mesmo espaço de tempo.

Assim, a incorporação de sistemas especialistas aos Centros de Supervisão e Controle proveria o despachante com diagnóstico, explanação e aconselhamento, tanto em sua operação diária, quanto em situações excepcionais, mantendo na sala de controle uma contínua disponibilidade do conhecimento de especialistas [53].

Há expectativas atualmente que a Inteligência Artificial vá se constituir no próximo grande aperfeiçoamento para as funções de um Sistema de Gerência de Energia, tornando-se no futuro um recurso comum nesse tipo de sistema [37].

Atualmente, sistemas especialistas já estão se tornando importantes como ferramentas adicionais para a operação do sistema, complementares às funções convencionais atualmente disponíveis [53].

IV.4.2 Aspectos da Incorporação de Sistemas Especialistas à Operação em Tempo Real

Um grande número de sistemas especialistas para Centros de Supervisão e Controle têm sido propostos, porém os diferentes aspectos e problemas da incorporação desses sistemas neste tipo de ambiente ainda não foram completamente investigados [43].

Isto se deve ao fato de que a Inteligência Artificial saiu recentemente dos laboratórios de pesquisa para a aplicação comercial, e a maior parte dos sistemas especialistas bem-sucedidos consiste em sistemas "stand-alone", interativos, e centrados em um único usuário [37].

A utilização de sistemas especialistas em ambientes de tempo real, típicos de controle de processos, como os Centros de Supervisão e Controle, está apenas começando [37]. A maior parte dos projetos empreendidos nesta área tem ficado a nível de protótipo, que no melhor caso, esboçam a promessa de alguma utilidade futura. Na prática, poucas aplicações tem tido verdadeiro êxito [30,31].

Na realidade, os sistemas especialistas ainda não foram incorporados às especificações dos Sistemas de Gerência de Energia atuais.

A seguir são apresentadas algumas características e requisitos particulares que os sistemas especialistas devem ter para sua incorporação nos Centros de Supervisão e Controle, e

consequente utilização na operação de sistemas elétricos.

IV.4.2.1 Sistemas Especialistas Integrados ao Centro de Supervisão e Controle versus Sistemas "Stand-Alone"

Do ponto de vista da integração com o ambiente do Centro de Supervisão e Controle, dois tipos de sistemas especialistas poderiam ser utilizados [44]:

- sistemas especialistas "stand-alone", centrados em um único usuário, e orientados para o diálogo.
- sistemas especialistas integrados ao ambiente do Centro de Supervisão e Controle.

Sistemas do primeiro tipo, comuns na área de Medicina, são utilizados com sucesso para consulta e aconselhamento.

A única interação deste tipo de sistema com o mundo exterior é através do diálogo com o usuário, que o utiliza formulando perguntas. O sistema especialista responde às perguntas, dá recomendações e elabora uma perícia. Enquanto trabalha na perícia, o sistema pode pedir informações adicionais ou solicitar decisões [44].

Obviamente sistemas deste tipo funcionariam isolados do sistema computacional do Centro de Supervisão e Controle, e seus recursos de Interface Homem-Máquina seriam próprios e distintos daqueles que os despachantes utilizam.

Uma possível aplicação para sistemas deste tipo seria a automatização da consulta a manuais, procedimentos ou às instruções de operação.

Sistemas integrados ao Centro de Supervisão e Controle utilizariam, além do conhecimento introduzido através de diálogo, os dados de tempo real disponíveis no Centro.

O processo de perícia poderia ser iniciado manual ou automaticamente, por eventos que viessem a ocorrer no sistema. Para isso, um componente de monitoração do processo seria necessário para verificar situações que requerem perícia automática. Um exemplo seria a análise automática de faltas, baseada no disparo de alarmes e eventos.

Para sistemas desse tipo, o diálogo com o despachante também é fundamental. O despachante poderia pedir explicações em relação às regras e inferências usadas para o sistema chegar à perícia, bem como forneceria informações adicionais aos sistemas especialistas, respondendo a perguntas ou tomando decisões.

Sistemas do primeiro tipo têm aplicabilidade muito limitada para a utilização na Operação. Assim, só serão considerados sistemas integrados ao Centro de Supervisão e Controle.

A figura IV.4 apresenta estes dois tipos de sistema.

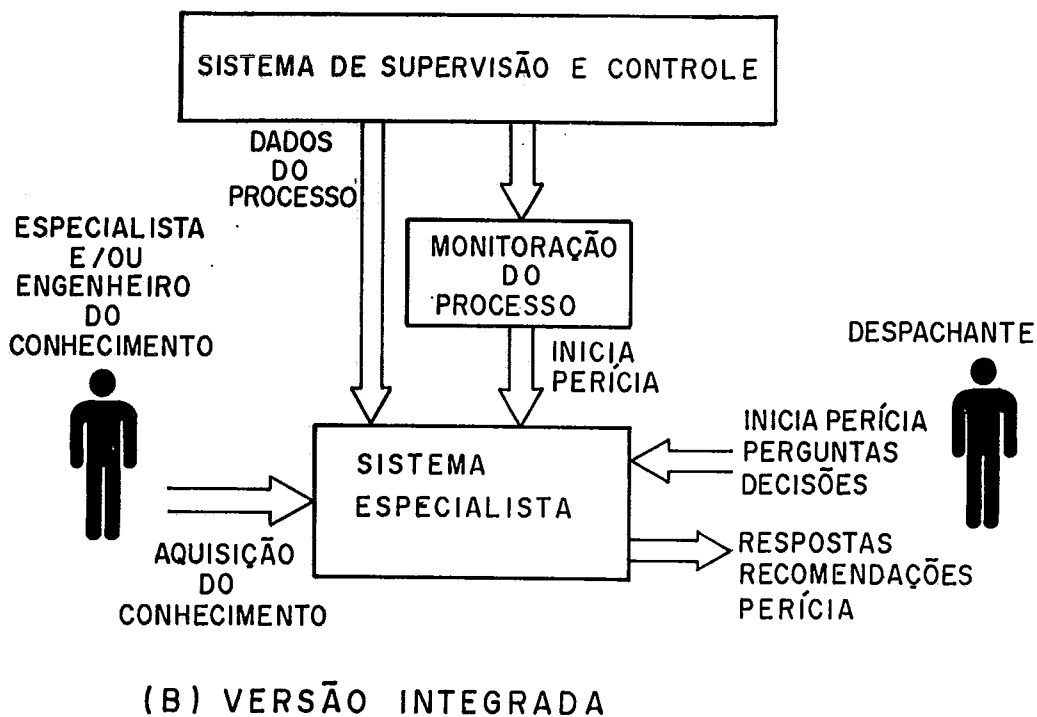
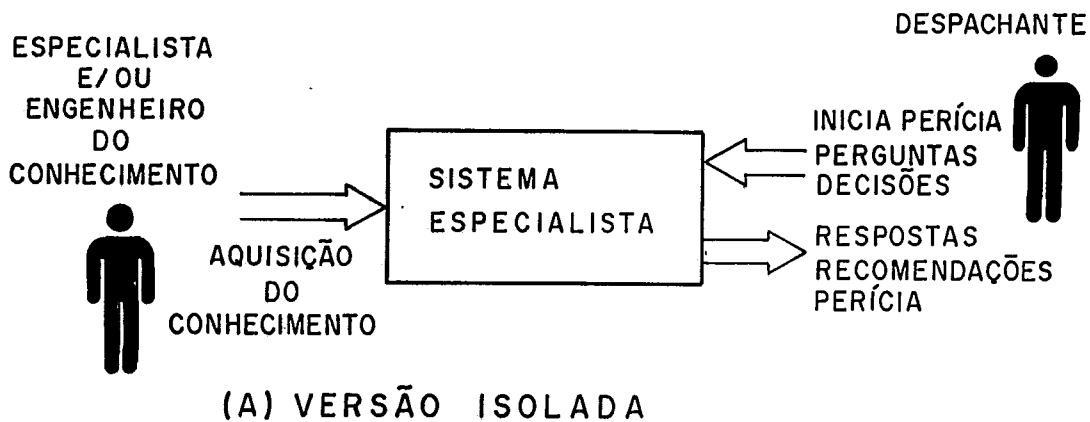


Fig. IV.4 SISTEMAS ESPECIALISTAS INTEGRADOS OU ISOLADOS.

IV.4.2.2 Aspectos Funcionais

A utilização de sistemas especialistas como ferramentas integradas ao ambiente de operação em tempo real do Centro de Supervisão e Controle impõe alguns requisitos funcionais básicos [53]:

- tempos de resposta compatíveis com um ambiente de tempo real, onde decisões rápidas têm de ser tomadas, principalmente em situações de emergência.
- robustez suficiente para ganhar a confiança do operador.

Um requisito considerado essencial por alguns autores [37,44,53] é a utilização dos mesmos recursos de Interface Homem-Máquina, tanto para o software convencional dos Sistemas de Gerência de Energia, quanto para os sistemas especialistas. Ou seja, a utilização das mesmas consoles utilizadas na sala de controle para a comunicação entre o despachante e o sistema especialista.

A convivência com mais de um tipo de Interface Homem-Máquina é altamente indesejável, mas não é impeditiva para a utilização dessa tecnologia, principalmente para a sua introdução em Sistemas de Gerência de Energia.

Em síntese, o despachante estaria interessado em obter perícias corretas em tempos de resposta curtos, preferencialmente através de simples diálogo via console normal de operação.

Deve ser levado em conta que, assim como para programas algorítmicos, pode haver dados de entrada incompletos, errados ou inconsistentes. O comportamento de um sistema especialista "robusto" deve se manter aceitável na maioria dessas situações [53].

Principalmente nos casos onde é necessária decisão rápida, um alto grau de confiança no sistema especialista seria necessário. As seguintes características "on-line" seriam necessárias para atingir esse alto grau de confiança :

- capacidade explanatória : o despachante teria a possibilidade de pedir explicações sobre fatos, regras e inferências sobre as quais se baseia a solução apresentada.
- capacidade do sistema especialista de detetar se há conhecimento suficiente para inferências conclusivas, e em caso negativo, de emitir mensagem neste sentido.

Atualmente, estas características não são plenamente atingidas. A capacidade explanatória dos sistemas especialistas, fica bem aquém do que se necessita, sendo em geral mais útil ao projetista do que ao usuário. A determinação se há conhecimento suficiente para levar a inferências bem fundamentadas é frequentemente um problema mesmo para o especialista humano [53].

Extensivos testes por parte dos projetistas, e treinamento na utilização dos sistemas especialistas por parte dos despachantes são imprescindíveis para tornar estes sistemas adequados para a utilização na operação.

IV.4.2.3 Aspectos de Implementação

A integração de sistemas especialistas nos Centros de Supervisão e Controle não é de modo algum a adição de um novo tipo de programa de aplicação, escrito em alguma linguagem de engenharia, como o FORTRAN [37,47].

Em essência, sistemas baseados em conhecimentos integrados ao Centro de Supervisão e Controle significam :

- integração aos ambientes de hardware e de software do centro.
- acesso aos dados de tempo real aqusitados e/ou produzidos no centro.

Alguns aspectos são essenciais do ponto de vista da implementação de sistemas especialistas integrados aos Centros de Supervisão e Controle:

- linguagens próprias para processamento simbólico.
- ambiente para desenvolvimento e manutenção de software.
- acoplamento ao software existente no Sistema de Gerência de Energia : base de dados, IHM, programas de aplicação, etc.

Como a IA lida com manipulação de informação simbólica, ela requer a utilização de linguagens especiais de programação, denominadas linguagens simbólicas, ao invés das tradicionais linguagens matemáticas, como o FORTRAN. A maior parte do

desenvolvimento atual é feito em LISP, ou PROLOG [37,47].

Atenção deve ser dada ao fato que a operação em tempo real pede resposta rápida. Ao implementar sistemas especialistas, linguagens como PROLOG ou LISP são aconselháveis para rápida prototipação, mas não preenchem em todos os casos os requisitos de resposta para operação em tempo real [53].

Grande parte da pesquisa hoje em dia é conduzida em hardware convencional, utilizando linguagens simbólicas, mas para se chegar à velocidade de execução necessária à utilização em tempo real em Sistemas de Gerência de Energia, muitas vezes é necessário hardware especial [37].

O ambiente de desenvolvimento de programas disponível em modernas estações de trabalho de IA ultrapassa os recursos comuns disponíveis para o desenvolvimento de software convencional de um Sistema de Gerência de Energia, tais como os editores de tela cheia, "debuggers" e software "run-time" em FORTRAN. O desenvolvimento de sistemas de IA baseia-se pesadamente em terminais gráficos de alta resolução, janelas, "debuggers" sensitivos ao contexto, e interpretadores rápidos, de modo a permitir ao programador criar e testar idéias rapidamente, como convém à rápida prototipação [37].

Assim, muitas das ferramentas de manutenção e desenvolvimento utilizadas em estações de trabalho "stand-alone" deverão se tornar disponíveis no ambiente de desenvolvimento de software de IA para um Sistema de Gerência de Energia [37].

Do ponto de vista do acoplamento ao software existente nos Sistemas de Gerência de Energia, as seguintes observações são pertinentes:

- é essencial o acesso à base de dados "on-line" do Centro, tanto aos dados brutos da supervisão em tempo real, quanto aos dados produzidos por programas de aplicação [37].
- sistemas especialistas deveriam poder usar as descrições de dados cadastrais, como por exemplo da topologia do sistema elétrico disponível no sistema do centro de controle [53].
- ferramentas para a atualização da base de dados deveriam ser também aplicadas para a atualização da base de conhecimentos dos sistemas especialistas [53].
- A IHM utilizada para os sistemas especialistas deve ter capacidade de dar suporte ao diálogo com o despachante. Através delas, o despachante deveria poder entrar dados e opções ou decisões quando solicitado pelo sistema especialista [44].
- A capacidade explanatória também deve ser suportada pela Interface Homem-Máquina. O despachante deveria poder entrar com perguntas, e então examinar nas telas da console regras e fatos utilizados para se chegar a uma inferência, e assim checar a correção dos resultados [44].
- é desejável que a IHM forneça uma interface adequada para a introdução e manutenção da base de conhecimentos, permitindo a fácil alteração de fatos e regras [44,53].

- do ponto de vista do acoplamento ao software de aplicação, as funções existentes em um Sistema de Gerência de Energia, tais como Fluxo de Potência e Estimador de Estado, devem poder ser utilizadas como subsistemas para produzir resultados que sejam subsequentemente usados para inferências [53].

IV.4.3 Alternativas para a Incorporação de Sistemas Especialistas aos Sistemas de Gerência de Energia

Atualmente duas formas de se incorporar sistemas baseados em conhecimentos aos Sistemas de Gerência de Energia podem ser utilizadas [37,47]:

- usar uma estação de trabalho de IA, que execute eficientemente linguagens do tipo LISP e PROLOG, e ligá-la ao ambiente do Sistema de Gerência de Energia via um canal de dados de alta velocidade.

- desenvolver software de IA numa estação de trabalho de IA e então recodificar o sistema em linguagem disponível no hardware do Sistema de Gerência de Energia.

A primeira opção apresenta as seguintes vantagens :

- manter as características básicas tanto do ambiente de IA quanto do ambiente do Sistema de Gerência de Energia.

- eliminar o problema de reescrever ou traduzir programas.

As desvantagem da primeira opção são :

- introduzir problemas de comunicação entre 2 diferentes processadores, com as limitações de velocidade do link de dados.
- necessidade de dar suporte a diferentes ambientes de hardware e software.

Já a segunda opção apresentaria a vantagem de eliminar a maior parte dos problemas quanto ao acoplamento com o software do Sistema de Gerência de Energia, permitindo o acesso direto à base de dados "on-line", a utilização dos mesmos recursos de IHM, o acesso aos resultados dos programas de aplicação, e aos recursos do sistema operacional.

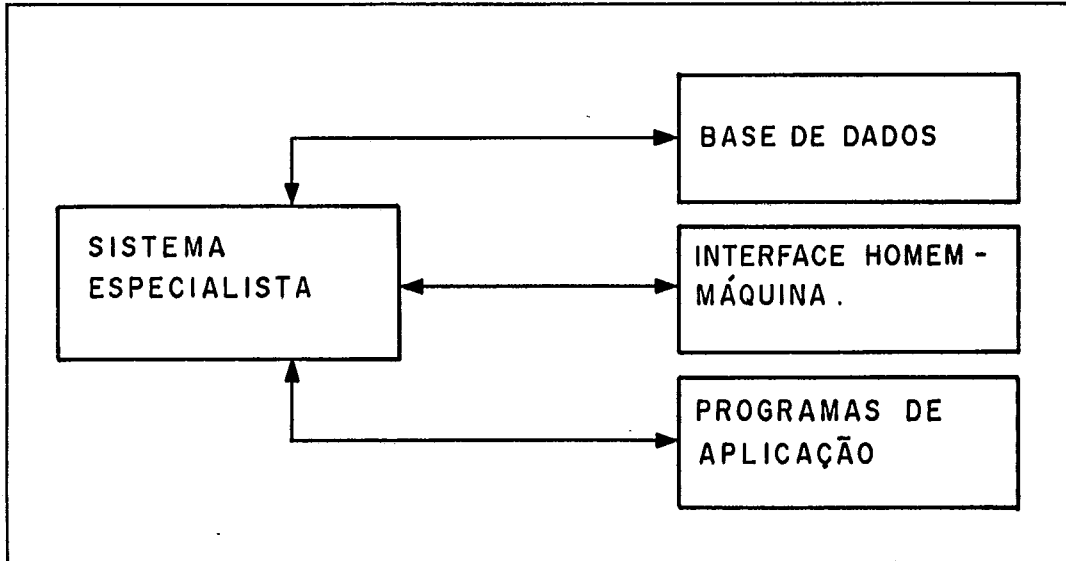
Contudo, esta opção traria as seguintes desvantagens:

- A disponibilidade de uma linguagem de IA, como LISP ou PROLOG, evitaria ou reduziria a recodificação, mas dificilmente o hardware geraria um código eficiente para aplicação em tempo real.
- A recodificação em linguagens tais como Pascal ou C, que têm algumas características necessárias para programação em IA, além de aumentar os custos, não garantiria a priori a mesma velocidade de execução obtida no protótipo.

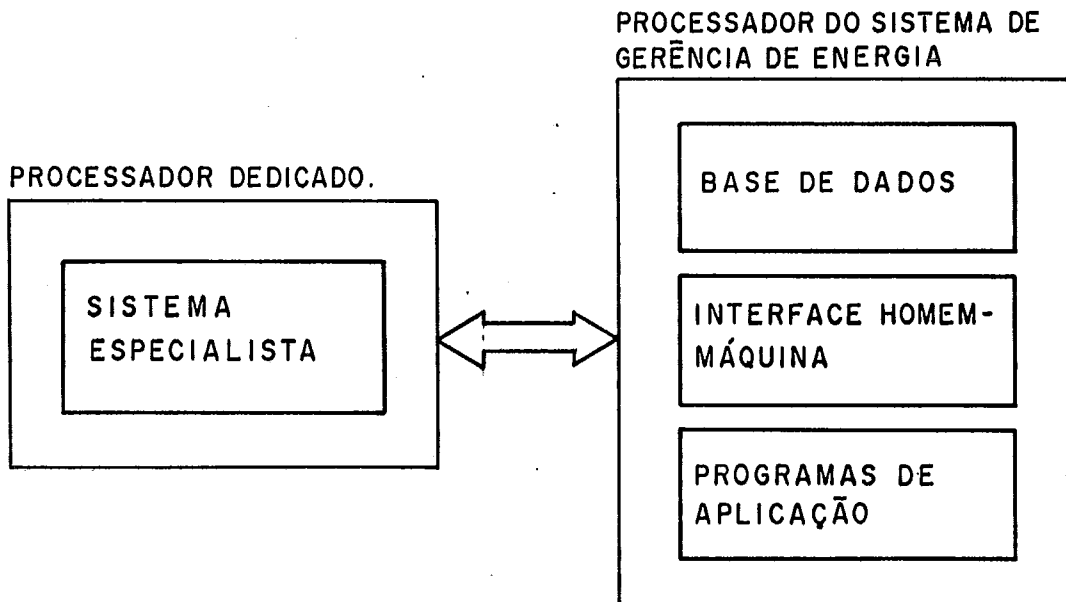
De qualquer modo, o desenvolvimento de aplicações de IA é melhor em ambiente de prototipação, mesmo que este ambiente não seja o ambiente de entrega.

A figura IV.5 apresenta as duas opções para a integração.

PROCESSADOR DO SISTEMA DE GERÊNCIA DE ENERGIA



(A) IMPLEMENTAÇÃO MONOLÍTICA (MESMO PROCESSADOR)



(B) IMPLEMENTAÇÃO DISTRIBUÍDA (PROCESSADOR DEDICADO)

Fig. IV. 5 OPÇÕES PARA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS ESPECIALISTAS AO SISTEMA DE GERÊNCIA DE ENERGIA

IV.4.4 Facilidades para Manutenção, Treinamento e Testes

A utilização de sistemas especialistas para a operação em tempo real de sistemas elétricos impõe a necessidade de uma série de recursos "off-line" para manutenção, treinamento e testes.

Esses recursos podem ser classificados em :

- recursos para manutenção da Base de Conhecimentos.
- recursos para validação e testes.
- recursos para treinamento.

A seguir serão discutidos estes recursos.

IV.4.4.1 Recursos para Manutenção da Base de Conhecimentos

A utilidade de um sistema especialista depende fortemente da qualidade da Base de Conhecimentos construída para o sistema [47].

A tradução de perícia humana numa base de conhecimentos envolve a formalização de conhecimento heurístico em regras, relacionamentos e procedimentos, e é atualmente uma das maiores barreiras para a utilização de sistemas especialistas na operação de sistemas elétricos [29].

A aquisição e representação de conhecimentos é um processo

complexo, que consome muito tempo, e necessita de estreita cooperação entre especialistas no domínio e engenheiros de conhecimento familiares com a estrutura e as possibilidades do sistema especialista [44].

A aquisição de todas as regras e fatos é somente o primeiro passo na tarefa de aquisição de conhecimento. Os próximos passos, tais como arranjar e classificar o conhecimento de uma forma conveniente, extrair conjuntos significantes de regras e fatos, reconhecer e eliminar contradições, aquisitar conhecimento adicional, e evitar redundâncias desnecessárias são tarefas que consomem ainda mais tempo [44].

A manutenção da Base de Conhecimentos é uma tarefa constante durante todo o ciclo de vida de um sistema especialista.

Em geral, um sistema especialista é aperfeiçoado, expandido ou corrigido através de uma nova versão de sua Base de Conhecimentos, o que se espera que seja um esforço menor do que o dispendido na expansão e alteração dos programas convencionais de hoje em dia [44].

No entanto, espera-se que o esforço de manutenção da Base de Conhecimentos seja maior do que o grande esforço dispendido na manutenção da Base de Dados dos Centros de Supervisão e Controle atuais [44].

Isto será exequível se novas ferramentas para representação e tratamento do conhecimento se tornarem disponíveis. Assim, deveriam ser fornecidas :

- ferramentas para permitir uma fácil detecção de lacunas, contradições, inconsistências e outros problemas [44].
- ferramentas para fácil representação de conhecimento, de forma que o especialista no domínio pudesse ele mesmo implementar seu próprio conhecimento no sistema especialista [51].

IV.4.4.2 Recursos para Validação e Testes

Embora seja mais fácil a adição de novas regras ou alterações do conhecimento existente em sistemas especialistas do que a alteração de programas convencionais, o esforço para verificação é bem maior [44].

A certeza absoluta da correção de qualquer perícia só pode ser alcançada checando-se todos os possíveis caminhos durante o processo de inferência, o que na maior parte dos sistemas especialistas reais demandaria uma grande quantidade de dados de teste, podendo gerar um crescimento exponencial de variações [44].

Um procedimento extensivo de validação é indispensável para se alcançar um alto grau de confiança na perícia do sistema especialista [44]. Um fator complicador é que ao se adicionar novo conhecimento, ou alterar o já existente, adições ou alterações nos dados de teste são necessárias.

Assim, o procedimento de validação e testes deve ter as seguintes características [44,53]:

- deve ser tanto quanto possível um procedimento de validação automática.
- deve ser realizado através de testes aleatórios, como única alternativa prática.

Por melhor que seja o procedimento de validação e testes, ele é condição necessária mas não suficiente para garantir a correção de um sistema especialista. A realidade algumas vezes fornece um conjunto de dados não previstos, mesmo para um especialista humano com alto grau de pericia [44].

Assim, na maior parte dos casos, o melhor método é começar com um protótipo de um sistema especialista, e utilizá-lo tão intensivamente quanto possível. Este pode ser o melhor meio de introduzir sistemas especialistas na operação do sistema elétrico [44].

IV.4.4.3 Recursos para Treinamento

No caso de sistemas especialistas que se propõem a auxiliar o despachante em situações não usuais ou emergenciais, estas ferramentas devem incluir recursos para treinamento, uma vez que o treinamento em condições reais é totalmente desaconselhável.

Isto requer o estabelecimento de uma série de cenários, para os quais deve ser fornecida orientação na aplicação da ferramenta.

O despachante deveria ser treinado em suas reações, nas diferentes situações esperadas, e em julgar as limitações do sistema especialista [53].

Embora o desenvolvimento de simuladores para treinamento de despachantes seja um problema bastante complexo, mesmo para as funções convencionais de um Centro de Supervisão e Controle, não há motivos para que estes simuladores não possam ser utilizados para estabelecer cenários para treinamento também na utilização de sistemas especialistas.

IV.4.5 Aplicações de Sistemas Especialistas na Operação de Sistemas Elétricos

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos propondo ou descrevendo aplicações de sistemas especialistas na operação de sistemas elétricos de potência.

Alguns artigos têm procurado avaliar de forma sistemática o potencial dos sistemas especialistas para a utilização na operação.

Nordgard e outros [51] propõem alguns critérios para avaliar aplicações potenciais de sistemas especialistas para a operação. Assim, sistemas especialistas deveriam ser desenvolvidos para :

- problemas não resolvidos satisfatoriamente com a presente tecnologia, e para os quais deve haver uma grande e

reconhecida necessidade de melhores ferramentas para o despachante.

- problemas caracterizados por uma grande quantidade de conhecimento, experiência e considerações.
- problemas não muito complexos nem muito fáceis de serem resolvidos, e para os quais o número de regras não deve exceder a poucas centenas.
- problemas para os quais os especialistas disponíveis são significativamente melhores na sua resolução do que leigos.
- problemas para os quais a perícia existente não está disponível continuamente, havendo grande risco de se perdê-la.
- problemas para os quais a introdução de sistemas especialistas apresenta grandes ganhos econômicos potenciais, ou pode dar contribuição substancial para a segurança do sistema.

Um relatório técnico do EPRI [33] faz um exame do potencial da tecnologia de IA para melhorar as estratégias de solução de problemas na operação de sistemas elétricos.

Este relatório utiliza dois parâmetros básicos para avaliar os problemas operativos importantes em que podem ser usadas técnicas de Inteligência Artificial : benefícios e factibilidade.

Para avaliar os benefícios, são utilizadas quatro métricas ou quesitos :

- economia de custo operacional.
- economia de custo de capital.
- melhor qualidade de serviço.
- possibilidade de generalização.

Para cada aplicação potencial, são então atribuídas notas a cada um desses quesitos. A nota representativa do benefício global é então a maior nota dos quesitos individuais, indicando que um alto benefício em algum dos quesitos isolados já justificaria a consideração da tecnologia de IA para a resolução do problema.

Para aplicações que apresentam alto benefício global, é então avaliada a factibilidade de solução com a tecnologia de IA, através de 6 métricas:

- existência do conhecimento.
- possibilidade do conhecimento ser programado.
- existência de sistemas computacionais adequados.
- tolerância a erros.
- custo de desenvolvimento.
- portabilidade.

Ao contrário do benefício global, uma baixa factibilidade em algum dos quesitos impediria a adoção desta tecnologia. Assim, a nota para factibilidade global é a menor das notas dos quesitos individuais.

As várias aplicações propostas e/ou implementadas para a operação de sistemas elétricos podem ser grupadas da seguinte forma:

- aplicações para diagnóstico e interpretação.
- aplicações para monitoração e controle.
- aplicações para assistência integrada.

As aplicações para diagnóstico e interpretação surgem da necessidade de fornecer ao despachante ferramentas para lidar com o grande número de informações telemedidas e apresentadas ao despachante, principalmente em situações de emergência [53].

Tornou-se evidente que a capacidade de aquisição e apresentação de dados de um Sistema de Supervisão e Controle ultrapassa em muito a capacidade do operador de filtrar e compilar os dados em informações úteis num intervalo razoável de tempo, que permita a ele reagir e limitar as consequências de um distúrbio [37].

Duas aplicações se destacam nesta área : o processamento de alarmes, e o diagnóstico de faltas.

O processamento de alarmes é uma das aplicações mais pesquisadas de sistemas especialistas para a operação. As referências [37,52,54,36] tratam desta aplicação. Lima, L.C. [36] apresenta um estudo detalhado sobre o assunto, e um protótipo de sistema especialista em que o próprio despachante poderia introduzir as regras na Base de Conhecimento.

Os métodos padrões de apresentação e classificação de alarmes não são adequados devido à importância dos alarmes depender dos distúrbios e se modificar de acordo com as condições do sistema, à medida que o distúrbio prossegue.

Um processador inteligente de alarmes poderia sumarizar rapidamente a grande quantidade de mensagens de alarme geradas durante situações anormais em um conjunto bem menor e mais significativo de mensagens de alarme, que auxiliem o despachante a entender o que está ocorrendo no sistema [52,53].

Os sistemas especialistas para diagnóstico de faltas tentam colocar à disposição do despachante, imediatamente após a ocorrência de uma falta, informações sobre a natureza e a localização da mesma. Baseiam-se para isso nos estados digitais aquisitados, referentes a disjuntores e aos relés de proteção operados. As referências [52,55] tratam dessa aplicação.

As aplicações para monitoração e controle procuram auxiliar o despachante na monitoração do sistema e na tomada de decisões, principalmente durante situações anormais, propondo ações de controle ao despachante. Estas aplicações têm em grande parte natureza híbrida, necessitando associar programação simbólica à programação numérica.

Dentre as principais aplicações nesta área se destacam o controle de tensão e reativo, a monitoração da segurança e o controle restaurativo.

As aplicações para controle de tensão e reativo procuram manter o perfil de tensão dos sistemas elétricos, incorporando

heurísticas baseadas em julgamento de engenharia a programas como o Fluxo de Potência Ótimo [47].

Um artigo importante nesta área é o de Liu e Tomsovic [46]. Este artigo propõe a construção de um sistema híbrido para assistir a tomada de decisão em sistemas elétricos, na presença de problemas de tensão. Este sistema utiliza regras empíricas para gerar ações de controle apropriadas quando ocorrem violações leves de tensão. Quando o problema de tensão é julgado mais severo, e um método mais sistemático é considerado necessário, o sistema auxilia na formulação do problema e dispara a execução de um algoritmo de despacho de reativo utilizando programação linear.

Uma outra referência importante nesta área é [32].

As aplicações para monitoração da segurança objetivam criar sistemas híbridos, onde métodos numéricos continuariam sendo usados para simular o efeito de contingências, mas sistemas especialistas seriam desenvolvidos para selecionar as contingências a serem simuladas, e para interpretar os resultados [45].

Duas referências importantes nesta área são [45,56]. O relatório técnico do EPRI [33] cita justamente esta área de aplicação como a mais promissora a curto prazo.

Uma terceira aplicação que começa a ser pesquisada é o controle restaurativo, que será tratado no próximo capítulo.

Outras aplicações pesquisadas são o controle preventivo e o controle em emergência.

A terceira área, de aplicações para assistência integrada objetiva a utilização de sistemas baseados em conhecimento para auxiliar o despachante a detetar problemas, a selecionar as ferramentas analíticas apropriadas, e a utilizar essas ferramentas [51].

Nordgard e outros [51] consideram como objetivo de mais longo prazo a integração de sistemas especialistas e programação convencional para construir dois grandes auxiliares :

- o assistente inteligente do despachante
- o controlador inteligente do sistema

O assistente inteligente do despachante seria um sistema híbrido baseado em conhecimentos que teria como objetivo coordenar e integrar as diferentes tarefas no ambiente do Sistema de Gerência de Energia.

O assistente inteligente seria formado através da integração das várias aplicações do terceiro grupo, de assistência integrada, e forneceria uma interface inteligente com o usuário para a utilização de modelos analíticos e numéricos na operação.

O controlador inteligente do sistema seria formado através da integração das aplicações para diagnóstico, interpretação, monitoração e controle, das duas primeiras áreas, a diversos programas algorítmicos, como Estimação de Estado, Fluxo de

Potência, Análise de Contingências, Fluxo de Potência Ótimo, Redespacho de Reativo, etc.

Este controlador inteligente filtraria e interpretaria os dados aquiridos em tempo real, monitoraria continuamente o sistema, e forneceria alternativas de ação ao despachante em todas as situações operativas.

O conceito de controlador inteligente retoma, anos mais tarde e com a incorporação de ferramentas de Inteligência Artificial, a concepção desenvolvida por DyLiacco, no final dos anos 60, de um sistema integrado para monitoração e controle da segurança do sistema elétrico de potência.

V. Sistemas Especialistas para a Reconposição de Sistemas Elétricos

V.1 Introdução

Desligamentos no sistema de potência são distúrbios severos que podem interromper o suprimento de energia em grandes áreas geográficas por muitas horas [57].

Em países desenvolvidos, os sistemas elétricos são robustos, e blecautes parciais ou totais são raros [57]. No Brasil, os sistemas elétricos operam perto de seus limites, e a ameaça de blecautes aumenta.

O impacto dos blecautes para a sociedade moderna é bastante grave em termos de inconveniência e custos. Como consequência, a recomposição rápida e segura é fundamental [58,59].

A recomposição de sistemas de potência consiste em tornar o suprimento de energia novamente normal, no mínimo de tempo, através de uma sequência de operações de religamento de linhas de transmissão, transformadores e equipamentos diversos, partida de máquinas elétricas, sincronização, tomada de cargas rejeitadas, etc. [60].

Devido à pouca exposição a estas situações, a experiência do pessoal de operação com a recomposição de sistemas elétricos é limitada em relação a outras situações operativas.

Apesar da disponibilidade de modernos Sistemas de Gerência de Energia, a recomposição continua sendo um processo manual extremamente complexo, requerendo extrema atenção a muitos detalhes [59].

A maior parte das empresas de energia elétrica aproximam o problema da recomposição do sistema após um grande distúrbio, através do desenvolvimento de planos de recomposição que procuram minimizar o impacto e restabelecer o serviço aos consumidores tão logo quanto possível [61,62].

O objetivo do plano de recomposição não é somente acelerar o processo, mas evitar o risco de danos nos equipamentos devido a sobretensões e sobrecargas, e evitar novos distúrbios que possam atrasar o processo total [61].

Contudo, o número de maneiras possíveis de recompor o sistema é muito grande, e pode mudar dependendo do estado de componentes críticos no momento em que o blecaute ocorre [62].

Os planos de recomposição não têm esta adaptabilidade às circunstâncias específicas de cada blecaute, e em geral traçam estratégias preferenciais de recomposição, contando com a disponibilidade de equipamentos que podem estar impedidos.

Estas estratégias preferenciais são resultado de diversos estudos e simulações "off-line", e correspondem aos cenários mais seguros para recompor o sistema. No entanto, estes cenários nem sempre são viáveis.

V.2 Formulação Analítica para o Problema da Reconposição

O problema global da reconposição é um problema complexo de decisão e controle para o pessoal de operação.

Conceitualmente, o problema da reconposição pode ser visto como um problema complexo de otimização com multi-objetivos, multi-estágios, combinatorial e com restrições não lineares. A obtenção de uma solução analítica para este problema é sem dúvida um desafio [13].

O objetivo do controle restaurativo é a rápida reconposição de todo o serviço aos consumidores, o que envolve minimização do tempo de reconposição e a maximização da restauração da carga do consumidor a cada estágio [13].

As restrições envolvidas no controle restaurativo são [13]:

- restrições de fluxo de potência: balanço de potência entre geração e carga, e limites de fluxo e tensão.
- restrições de estabilidade: estabilidade dinâmica e transiente do sistema, relacionadas à variação de frequência e a considerações quanto à sincronização.
- restrições de partida de unidades geradoras: características de partida quente ou fria das unidades.
- restrições de capacidade de tomada de carga das unidades geradoras.
- restrições relativas à sequência de operações de

religamento de linhas de transmissão e interligação.

As variáveis de controle são a programação de geração das unidades geradoras, e as sequências de religamento [13].

Durante a recomposição, o despachante toma uma série de decisões baseadas em [13]:

- conhecimento do estado corrente do sistema.
- identificação das alternativas viáveis.
- análise da consequência de cada alternativa.

Wu e Monticelli [13] propõem uma formulação conceitual de natureza predominantemente analítica para a resolução do problema da recomposição. Esta formulação baseia-se em duas premissas:

- a função de Monitoração do Estado do sistema, constituída basicamente por programas de Configurador da Rede e Estimador de Estado, pode ser adaptada para utilização durante o estado restaurativo.
- o problema global da recomposição pode ser decomposto em uma série de subproblemas mais tratáveis, que podem ser utilizados como blocos de construção da solução do problema global.

As seguintes alterações ou adições são propostas para tornar a função de Monitoração de Estado, adequada para utilização no estado normal, aplicável também ao estado

restaurativo [13] :

- A Monitoração do Estado deve ser capaz de identificar e tratar múltiplas ilhas elétricas, uma vez que o sistema elétrico encontra-se frequentemente fragmentado durante a recomposição.

- A Monitoração do Estado deve ser capaz de identificar e tratar múltiplas ilhas de observabilidade, já que a perda de canais de comunicação durante a recomposição não é evento raro.

De acordo com a proposta de decomposição do problema global em subproblemas mais simples, o problema da recomposição é formulado como um problema de fluxo de potência multi-estágios, onde a configuração do sistema e as restrições de fluxo de potência são representadas diretamente no modelo, e as demais restrições, ligadas a modelos dinâmicos, são transcritas em limites de tensão e de fluxos, que necessitam de atualização durante a recomposição [13].

Wu e Monticelli propõem três blocos funcionais para o problema da recomposição:

- um bloco de modelagem, que utiliza a função estendida de Monitoração do Estado, e que traduz as restrições dinâmicas em restrições de fluxo de potência, estabelecendo um modelo de fluxo de potência para o bloco de análise e otimização.

- um bloco de análise e otimização, composto de uma biblioteca de ferramentas analíticas diversas, constituídas

por variações (versões lineares, não lineares, com ou sem tratamento de ilhamento, etc.) dos programas básicos de fluxo de potência e de fluxo de potência ótimo.

- um bloco de síntese, que identifica as alternativas viáveis e as relaciona aos subproblemas envolvidos, selecionando as ferramentas analíticas apropriadas, disponíveis no bloco de análise e otimização, e controlando a execução dessas ferramentas.

Enquanto os dois primeiros blocos seriam de natureza algorítmica, o bloco de síntese seria um sistema baseado em conhecimentos.

Algumas questões em relação ao aspecto da otimização são importantes de serem colocadas :

- a recomposição rápida parece ser mais um problema de factibilidade do que de otimalidade, de decisão binária do que de processos contínuos [57].

- é bastante difícil formular matematicamente critérios para otimalidade [47].

O problema da recomposição é matematicamente tão complexo e operacionalmente tão delicado que a implementação de uma solução "on-line" baseada predominantemente em programação matemática parece ser pouco viável a curto prazo [60,61].

A viabilização de uma aproximação predominantemente analítica depende de :

- avanços computacionais do processamento paralelo para

permitir a implementação eficiente das técnicas de decomposição propostas, e a análise simultânea de alternativas [15].

- avanços na programação matemática para permitir a resolução com eficiência compatível com um ambiente de tempo-real, de vários dos subproblemas identificados por Wu e Monticelli [13].

Com a atual tecnologia, o método numérico tem se mostrado inadequado para esse e para muitos outros problemas na operação de sistemas elétricos [47].

A extensão da funcionalidade da Monitoração de Estado é uma necessidade já sentida nos Centros onde a função está instalada. As limitações relacionadas a ilhamentos diversos tornam essa função mais frágil do que se esperava.

Sistemas propostos para tratamento da recomposição têm sido baseados predominantemente em conhecimento. Ferramentas analíticas do tipo fluxo de potência têm sido utilizadas ou propostas apenas acessoriamente.

V.3 Formulação Baseada em Conhecimentos para o Problema da Recomposição

Durante a recomposição, os despachantes tomam uma série de decisões para estabelecer :

- uma sequência de religamentos.
- uma sequência de tomada de carga.
- uma programação geração/carga.

As mudanças na topologia de conexão durante o curso da recomposição devem ser resolvidas através de buscas numa árvore de solução [58].

O espaço de decisão ao nível de simples equipamentos individuais é de dimensionalidade extremamente alta, e a consideração de cada alternativa de religamento pode levar facilmente ao fenômeno de explosão combinatória [57].

Para podar esta árvore de solução, sistemas baseados em conhecimentos são bastante adequados.

Wu e Monticelli [13] reconhecem o risco de explosão combinatória na seleção de alternativas viáveis, propondo um sistema baseado em conhecimentos para o bloco de síntese.

Reconhecida a necessidade de incorporação de sistemas baseados em conhecimento para a solução do problema da recomposição, e a inexequibilidade atual de muitas aproximações numéricas, há ainda questões básicas para se definir conceitual e funcionalmente o papel dos sistemas especialistas na recomposição :

- qual a natureza do conhecimento que será codificado ?
- a solução adotada deve ser isolada em um sistema "stand-

alone" ou integrada aos sistemas de supervisão e controle ?

- qual o grau de integração com ferramentas numéricas ?

- qual o papel dos sistemas: auxílio aos agentes humanos ou automatização da recomposição ?

- a solução adotada deve estar concentrada no despachante ou distribuída pelos demais agentes participantes da recomposição ?

A seguir estas questões serão discutidas, com o objetivo de levantar opções, e estabelecer princípios básicos para a proposta que será apresentada.

V.3.1 O Conhecimento Necessário à Recomposição

Uma questão fundamental é a natureza do conhecimento que seria codificado nestes sistemas.

Um sistema especialista tradicional adquire conhecimento da experiência acumulada de um especialista. No caso da recomposição, não há especialista com conhecimento suficiente [13].

Comparando-se o caso da recomposição com um sistema especialista pioneiro, o Mycin, não há despachantes com perícia em recomposição comparável à de médicos no diagnóstico e terapia de doenças infecciosas [58].

A experiência acumulada é muito pequena. Embora haja incidentes registrados, seu modo de ocorrência é muito aleatório, e os detalhes de cada incidente são muito diferentes e específicos de cada sistema elétrico [58].

No caso específico da recomposição, a Base de Conhecimentos deveria ser construída a partir do entendimento mais profundo do problema, e deve refletir não só as leis físicas do sistema, mas as estratégias de recomposição planejadas "off-line", e as heurísticas do despachante [13].

A estratégia global de recomposição difere de empresa para empresa, devido à adoção de filosofias diversas, e especialmente a características particulares de cada sistema e de seus componentes [61].

Isto limita a portabilidade de sistemas especialistas para recomposição [63].

Em geral, a filosofia e as estratégias de recomposição são utilizadas para criar planos de recomposição, através de estudos e simulações "off-line" do comportamento estático e dinâmico do sistema. Estes planos de recomposição são então traduzidos em instruções de operação, que os despachantes e operadores de usinas e subestações devem seguir.

O problema é que estas instruções de operação não contemplam muitas situações que podem ocorrer durante a recomposição, algumas delas imprevisíveis e não usuais.

A falta de adaptabilidade e de inter-atividade dos procedimentos atuais justifica a adoção de sistemas

especialistas [61].

Alguns autores [58,64] propõem a codificação não de planos de recomposição, mas somente de estratégias globais, associadas a heurísticas do despachante como forma de codificar situações particulares. O objetivo dos sistemas especialistas seria então construir "on-line" planos de recomposição do sistema, de acordo com as condições correntes do sistema.

Sakaguchi e Matsumoto [58] constroem um protótipo composto de apenas 16 regras para um sistema pequeno de testes, utilizando estratégias de recomposição bem simples. Já Moriguchi e outros [64] constroem um sistema especialista para um sistema elétrico radial de subtransmissão, com um única fonte de recomposição.

Esse tipo de abordagem não parece ser capaz de resolver o problema da explosão combinatória para sistemas elétricos reais de grande porte. Não é razoável deixar de lado grande parte do conhecimento obtido por estudos "off-line".

A não incorporação desse conhecimento equivale a considerar uma série de ramos da árvore de decisão que a priori já se sabe que não são viáveis ou seguros.

Assim, parece ser uma melhor aproximação a codificação das instruções de operação na Base de Conhecimentos. Estas instruções são facilmente codificadas através de regras de produção.

Por outro lado, seria necessário que as próprias instruções de recomposição abrangessem um número maior de situações. Isto poderia ser obtido através da simulação "off-line" de alguns

cenários básicos, de modo que os planos de recomposição e as instruções de operação derivadas destes planos pudessem incorporar as alternativas mais importantes.

O sistema especialista não deduziria então um plano de recomposição, mas selecionaria dentre as alternativas estudadas e selecionadas a priori, uma alternativa compatível com o estado do sistema elétrico.

Na realidade, a análise "off-line" para a exclusão de alternativas supriria em parte a deficiência das ferramentas algorítmicas para implementar essa análise "on-line", como propõem Wu e Monticelli [13].

V.3.2 Sistemas Especialistas Integrados versus Isolados

A referência [44] propõe um sistema especialista para recomposição em modo diálogo, sem acesso aos dados de tempo real.

No capítulo IV, este tipo de sistema especialista foi discutido, e sua utilidade considerada muito restrita para aplicação na operação de sistemas de potência. A integração com os sistemas de supervisão e controle disponíveis, e principalmente o acesso aos dados adquiridos em tempo real, e àqueles produzidos por aplicações, foi considerada essencial para qualquer sistema especialista utilizado na operação, o que se aplica totalmente neste caso específico.

No entanto, para treinamento ou como um primeiro protótipo,

onde o usuário testaria o sistema simulando em modo diálogo dados de tempo real, um sistema deste tipo seria bastante útil.

V.3.3 Integração com Ferramentas Numéricas

A solução predominantemente algorítmica mostrou-se inadequada, e inexequível atualmente.

Uma solução totalmente baseada em conhecimentos apresenta claras limitações. No caso do conhecimento obtido de instruções de operação para recomposição, estas se baseiam em simulações "off-line", que nem sempre são uma aproximação válida para a situação real.

Para verificar se a alternativa proposta é adequada, ou para o caso de o sistema baseado em conhecimentos não poder indicar uma alternativa, um método mais sistemático de simulação é bastante conveniente.

Uma solução mais adequada seria realmente a solução híbrida, mas predominantemente baseada em conhecimentos.

Além da proposta de Wu e Monticelli [13], outros autores propõem soluções híbridas, com a utilização mais restrita de fluxo de potência.

Sakaguchi e Matsumoto [58] propõem um sistema híbrido cujo objetivo é restaurar o fornecimento de energia sem sobrecargas nas linhas. Para isso, é proposto o fluxo de potência para simulação dos planos de recomposição e posterior cheque de

sobrecargas.

Wang e outros [60] também propõem sistemas híbridos onde é utilizado o fluxo de potência para checar a segurança em termos de fluxos e tensões durante a recomposição.

A idéia de extensão da Monitoração de Estado no Sistema de Gerência de Energia para utilização também durante a recomposição é importante, no sentido de que o Configurador da Rede é capaz de dar uma visão sistêmica da topologia corrente da rede, e o Estimador de Estado confere maior confiança a grandezas elétricas essenciais durante a recomposição.

Sistemas híbridos para recomposição deveriam preferencialmente trabalhar utilizando as informações provenientes da função de Monitoração de Estado.

Uma arquitetura proposta para tais sistemas deveria ser suficientemente flexível para acomodar a introdução de ferramentas algorítmicas para a simulação de alternativas, à medida que estas ferramentas se viabilizassem para utilização em tempo-real.

V.3.4 O Papel dos Sistemas Especialistas: Assistência versus Automação

Duas alternativas básicas se apresentam para o papel de sistemas especialistas para recomposição de sistemas elétricos:

- auxiliares de decisão : os sistemas serviriam como

consultores ou assistentes, propondo alternativas de ação ou monitorando o processo.

- executores automáticos da recomposição : os sistemas determinariam as melhores alternativas e telecomandariam as ações correspondentes.

Sakaguchi e Matsumoto [58], e Blessing e outros [59] propõem sistemas especialistas para automatizar a recomposição. Outros autores [57,60,61,64] propõem auxiliares de decisão.

Blessing e outros [59] justificam esta proposição pela necessidade de recomposição rápida, que não seria conseguida com um sistema que fornecesse orientação ao despachante. Assim a proposta é um sistema de malha fechada com a mínima intervenção do despachante.

Outra razão apontada para a automatização seria a redução do potencial de erro [59].

A opção automática baseada em perícia de sistemas especialistas é uma opção bastante arriscada e ambiciosa no atual estado da arte dos sistemas baseados em conhecimento aplicados à operação de sistemas elétricos.

Alguns esquemas automáticos locais são usados para acelerar a recomposição. Por exemplo, o fechamento automático de disjuntores de circuitos de mais baixa tensão, para permitir a tomada de carga imediata a nível de distribuição. Outro exemplo são os esquemas de ilhamento automático para preservar parte do sistema durante distúrbios.

No entanto, a recomposição ao nível do sistema como um todo é uma tarefa difícil para automatizar, e tem portanto permanecido como uma operação manual [55].

O controle em malha fechada só poderia ser aceito se o sistema pudesse assegurar um nível de confiança extremamente alto [59].

Os próprios autores de [58] reconhecem que desenvolver um sistema automático para recomposição global é um grande desafio, e que no atual estado da arte um sistema deste tipo ainda não deveria ser utilizado "on-line".

Assim, o papel de auxiliar do operador humano é mais promissor, e mais exequível em termos práticos.

A questão pendente é então a forma de auxílio que pode ser dada. A maioria dos autores prefere sistemas que forneçam aos operadores humanos as alternativas de ação a cada passo da recomposição.

Darnault e outros [61] propõem um enfoque complementar para o auxílio que pode ser dado. Além da proposição de alternativas, sistemas especialistas poderiam auxiliar da seguinte forma:

- elaborando uma síntese do estado do sistema, fornecendo informações relevantes para tomada de decisão. Assim, o sistema especialista poderia apresentar informações sobre as usinas que necessitam de energização auxiliar, o tempo que resta para a partida de unidades térmicas, os ilhamentos que necessitam ser reconectados, as partes desenergizadas do

sistema, etc.

- verificando se a decisão do despachante segue a estratégia global.

Um sistema para a recomposição deveria fornecer todas estas formas de auxílio.

V.3.5 Sistema Distribuído versus Sistema Centralizado

A filosofia de recomposição distribuída, exposta no capítulo III, baseia-se na descentralização do procedimento de recomposição para garantir a rapidez do processo.

Para sistemas de médio e grande porte, esta rapidez é comprometida com o procedimento centralizado no COS da empresa.

Para obter essa descentralização, a responsabilidade pela recomposição é distribuída entre despachantes do COS e operadores de usinas e subestações.

Assim, um sistema computacional proposto para auxiliar os agentes humanos envolvidos na recomposição deve se adequar a esta divisão de tarefas, e estar distribuído entre os pólos de decisão e execução do procedimento de recomposição.

V.4 O Conceito de Sistema Distribuído para a Resolução de Problemas

A recomposição de sistemas elétricos é um problema complexo, que apresenta as seguintes características :

- necessita ser decomposto em um conjunto de subproblemas menores, mais tratáveis.
- os subproblemas têm natureza heterogênea, alguns necessitam de processamento numérico, outros de processamento simbólico.
- os subproblemas podem ser resolvidos em paralelo, de forma a melhorar a eficiência global na solução do problema.

Sistemas Distribuídos para a Resolução de Problemas (DPS) é uma metodologia de software, consolidada na área de Inteligência Artificial, e adequada para descrever problemas com as características acima [38,62].

Sistemas Distribuídos para a Resolução de Problemas são utilizados em organizações de software de larga escala [65], que procuram imitar a forma de resolução de problemas de organizações humanas.

Organizações humanas podem realizar tarefas bastante complexas em situações altamente incertas, da seguinte forma [65] :

- usando um número muito grande de agentes.
- fornecendo vários mecanismos poderosos de cooperação.

- empregando aproximações paralelas na resolução de problemas.

Sistema Distribuído para Resolução de Problemas é um conceito utilizado para descrever sistemas formados por dois tipos de componentes [38]:

- um conjunto de resolvedores de problemas distintos e independentes.
- um mecanismo de controle para promover cooperação entre eles.

Os resolvedores de problemas (RP) podem ser humanos ou computacionais. Os resolvedores de problemas computacionais são programas que podem residir em computadores exclusivos, ou podem compartilhar computadores com outros resolvedores de problemas [33,38].

O mecanismo de controle deve gerenciar o fluxo de informações entre os RPs e assegurar que eles cooperem entre si efetivamente [38].

Cooperação, significando compartilhamento de dados brutos e processados, é necessária quando um único RP não pode tratar o problema inteiro. Para promover cooperação efetiva, o mecanismo de controle deve conhecer o potencial, as fraquezas e a capacidade de cada RP e deve ter um modo de alocar subproblemas a cada um [38].

O mecanismo de controle pode ser centralizado em um dos RPs ou distribuído entre eles [38].

Um sistema distribuído de resolução de problemas pode ser dividido em três categorias distintas, de acordo com a natureza dos resolvedores de problemas :

- todos os RPs são humanos
- alguns RPs são programados
- todos os RPs e o mecanismo de controle são programados

Instâncias dessa terceira categoria são raras e tendem a ser de aplicabilidade limitada, devido à tecnologia para automatizar DPS ser ainda incipiente [38].

Para promover a construção de organizações de software de larga escala, uma arquitetura de quadro-negro ("blackboard") vem sendo proposta [65].

Quadro-negro é uma base de dados distribuída, através da qual módulos autônomos se comunicam [28].

O quadro-negro não armazena apenas dados brutos ou processados. Na realidade, seria uma base de dados para mensagens, que podem conter dados, comandos, hipóteses e pedidos de auxílio [38].

A cooperação e comunicação entre usuários e outros RPs é efetuada através dessas mensagens. Um monitor de quadro-negro faz a escrita dessas mensagens e chama a atenção dos RPS para mensagens de seu interesse [38].

Uma arquitetura de quadro-negro é bastante aberta e

flexível. Permite integrar RPs humanos, RPs baseados em conhecimentos e RPs algorítmicos em diferentes processadores, sob sistemas operacionais diversos, e escritos em diferentes linguagens. A expansão do número de RPs é feita simplesmente dando-lhes acesso ao quadro-negro.

Com base no conceito de Sistema Distribuído para Resolução de Problemas e na arquitetura de quadro-negro, foi desenvolvido um sistema de suporte denominado DPSK - "Distributed Problem Solving Kernel" [28,62,63,65,66].

O DPSK foi desenvolvido originalmente para um conjunto de estações de trabalho sob o sistema operacional UNIX, e ligadas em rede local. Mais tarde foram feitas expansões para acomodar micros pessoais PC-XT ou AT, sob o sistema operacional DOS [66]. Atualmente uma nova versão pretende incluir estações de trabalho sob o VMS, da DIGITAL.

O DPSK fornece uma base de dados distribuída, acessada via transações e com os dados estruturados internamente como objetos, uma variação dos "frames".

Para cooperação entre os módulos, o DPSK fornece um pequeno número de primitivas, que efetuam funções de sincronização, execução e interrupção dos módulos. Essas primitivas podem ser utilizados por módulos desenvolvidos em C, FORTRAN, OPS-5 e alguns tipos de LISP.

O mecanismo para sincronização entre módulos é implementado através do conceito de evento. Evento é uma condição que um módulo deve esperar, antes de continuar o processamento.

Um sistema de suporte tipo DPSK permite a implementação do conceito de Sistemas Distribuídos para Resolução de Problemas, integrando um conjunto de módulos numéricos e baseados em conhecimento em um ambiente de multiprocessadores altamente flexível e expansível.

Na referência [67], Cardoso e Talukdar propõem um sistema especialista híbrido e distribuído para diagnóstico de faltas, utilizando o DPSK.

O sistema computacional de um Centro de Supervisão e Controle de um sistema elétrico pode ser visto como um Sistema Distribuído de Resolução de Problemas, onde a tomada de decisão é feita por resolvidores humanos de problemas, denominados despachantes, que interagem com resolvidores de problemas programados, tais como Estimador de Estado, CAG, Fluxo de Potência, etc. [33,38,43].

Este ambiente distribuído de resolução de problemas tem as seguintes características próprias [33,38] :

- grande parte da coleta e gerenciamento de dados de tempo real do sistema de potência foi automatizada.
- grande parte das informações procedurais (o que fazer nas várias circunstâncias) estão compiladas em Manuais de Operação, mas não automatizadas. Estas informações procedurais tendem a ser específicas de cada empresa.
- há um grande número de resolvidores de problemas programados. Alguns trabalham em tempo real, outros são "off-

line" e são executados somente quando chamados pelos operadores para estudos.

- nos centros atuais, os resolvedores de problemas programados são quase sempre algorítmicos. Atividades baseadas em conhecimentos e o controle global do ambiente distribuído de resolução de problemas são efetuados pelos despachantes.

- a operação de sistemas de potência é uma longa rotina interrompida por emergências ocasionais. Estas emergências não são otimamente tratadas e a menos que sejam fornecidas mais ferramentas aos despachantes, o tratamento de crises pode apenas piorar no futuro.

V.5 Proposta de um Sistema Distribuído Híbrido para Auxílio à Recomposição

O objetivo deste tópico é esboçar uma proposta a nível conceitual e funcional de um Sistema Híbrido Distribuído para Auxílio à Recomposição.

Este sistema é descrito na forma de um Sistema Distribuído para Resolução de Problemas, e incorpora a arquitetura de quadro-negro, descrita no tópico anterior.

V.5.1 Características Básicas do Sistema

O Sistema proposto apresenta as seguintes características básicas:

- seu objetivo é prestar assistência aos despachantes do Centro de Operação da Empresa, e aos operadores das usinas e subestações.
- é um sistema híbrido, composto por módulos baseados em conhecimento e módulos numéricos.
- é um sistema integrado aos Centros de Supervisão e Controle disponíveis para a operação, tendo acesso tanto aos dados brutos aquiritados em tempo real, como aos dados processados por aplicações diversas.
- é um sistema distribuído, onde módulos podem estar em diferentes processadores, em locais diversos, prestando serviços a agentes humanos tanto no COS da empresa, como CORs, como nas usinas e subestações.
- a filosofia de recomposição adotada é a filosofia distribuída descrita no capítulo III, que divide a recomposição em etapas fluente e coordenada, e distribui atribuições entre despachantes e operadores das estações.
- o conhecimento codificado nos módulos baseados em conhecimento é obtido das instruções de operação para recomposição, que traduzem para linguagem operativa os planos de recomposição elaborados "off-line", segundo a filosofia distribuída citada acima.

V.5.2 Arquitetura Proposta para o Sistema

O Sistema Distribuído Híbrido para Auxílio à Recomposição é descrito como um Sistema Distribuído para a Resolução de Problemas, e apresenta uma arquitetura de quadro-negro.

Esta arquitetura é adotada com os seguintes objetivos:

- permitir uma ampla integração entre módulos numéricos e módulos baseados em conhecimento.
- permitir uma ampla flexibilidade do sistema em termos de processadores, sistemas operacionais e linguagens adotadas.
- permitir a fácil expansão, tanto para módulos algorítmicos como baseados em conhecimentos. Por exemplo, um pacote para análise de alternativas utilizando fluxo de potência, e um sistema especialista para diagnóstico "on-line" de faltas, poderiam ser posteriormente incorporados.

O sistema proposto é composto por um conjunto de resolvedores de problemas humanos e programados, que cooperam e se comunicam entre si através de uma base de dados distribuída, e de controladores de acesso à base de dados.

Os resolvedores de problemas humanos são os despachantes do COS e os operadores das estações, e são os agentes de decisão e execução da recomposição.

Os resolvedores de problemas programados pretendem auxiliar os agentes humanos a promoverem a recomposição, através da monitoração do processo, e da proposição de alternativas, que

podem ser seguidas ou não.

A figura V.1 apresenta a arquitetura de software proposta. O retângulo à esquerda corresponde ao subsistema dedicado ao COS, enquanto os retângulos à direita, iguais em estrutura, são os subsistemas dedicados a cada uma das usinas e subestações.

Para cada subsistema há um RP para controle do acesso à base de dados distribuída. A comunicação entre os resolvidores de problemas é feita através da base de dados distribuída, com a utilização dos Controladores de Acesso.

A figura V.2 apresenta um grafo onde os nós são os RPS e os arcos representam fluxos de dados ou eventos entre RPs. Linhas sólidas representam fluxos de dados, enquanto linhas pontilhadas representam eventos. De acordo com a conceituação do DPSK, evento é uma variável global da base de dados, utilizada para sincronização entre RPs [63]. Um RP pode se sincronizar com outros através de um evento que o mesmo deve esperar para continuar sua execução.

Uma observação é importante. Embora esta figura represente trocas de dados e eventos entre RPs, na verdade eles são dirigidos à base de dados distribuída, através do Controlador de Acesso. Qualquer cooperação entre RPs é feita através dessa forma indireta.

A arquitetura de hardware do sistema é flexível. Cada subsistema não precisa ser necessariamente um único processador, mas pode ser um conjunto de processadores ligados por rede local.

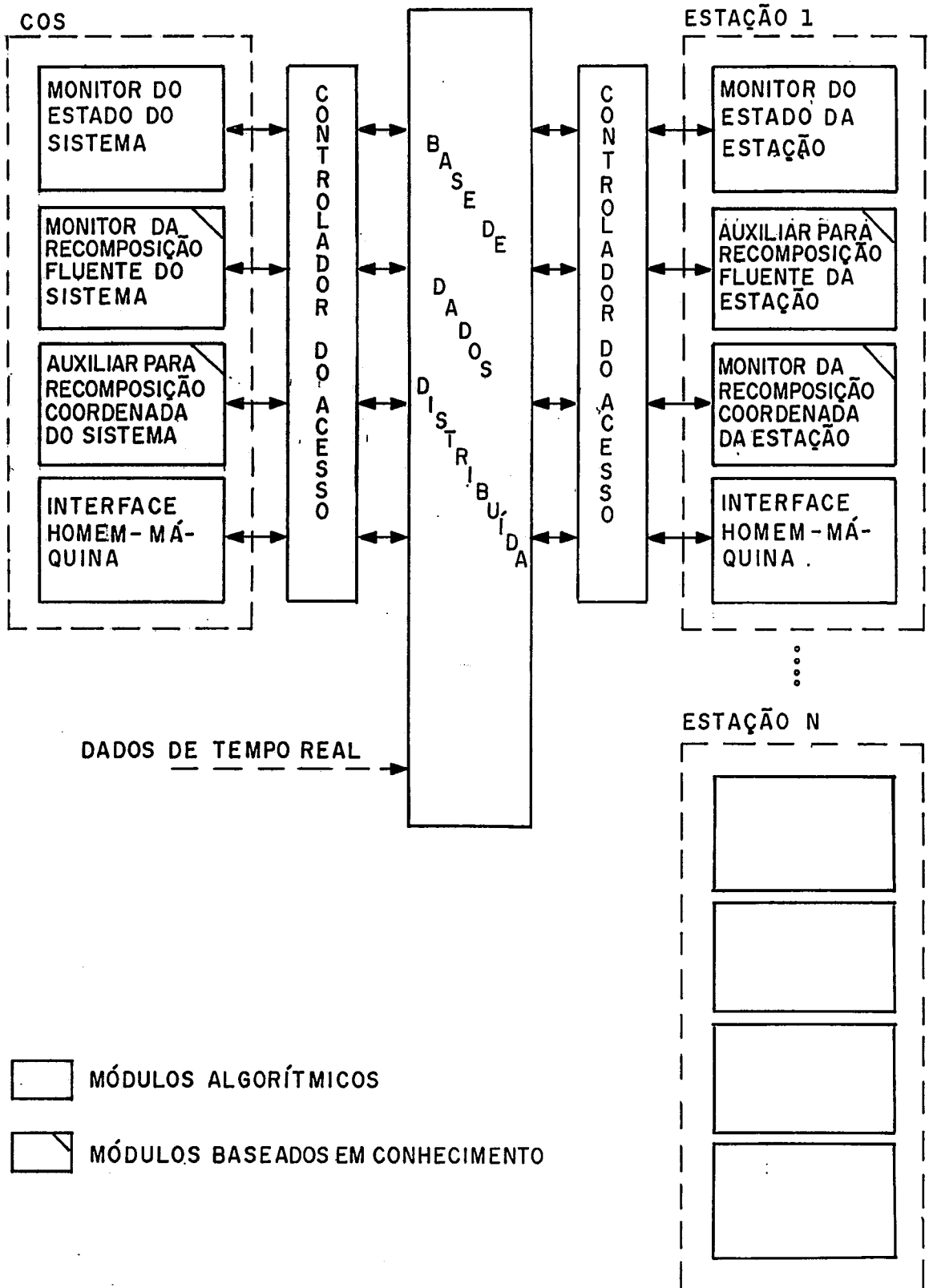
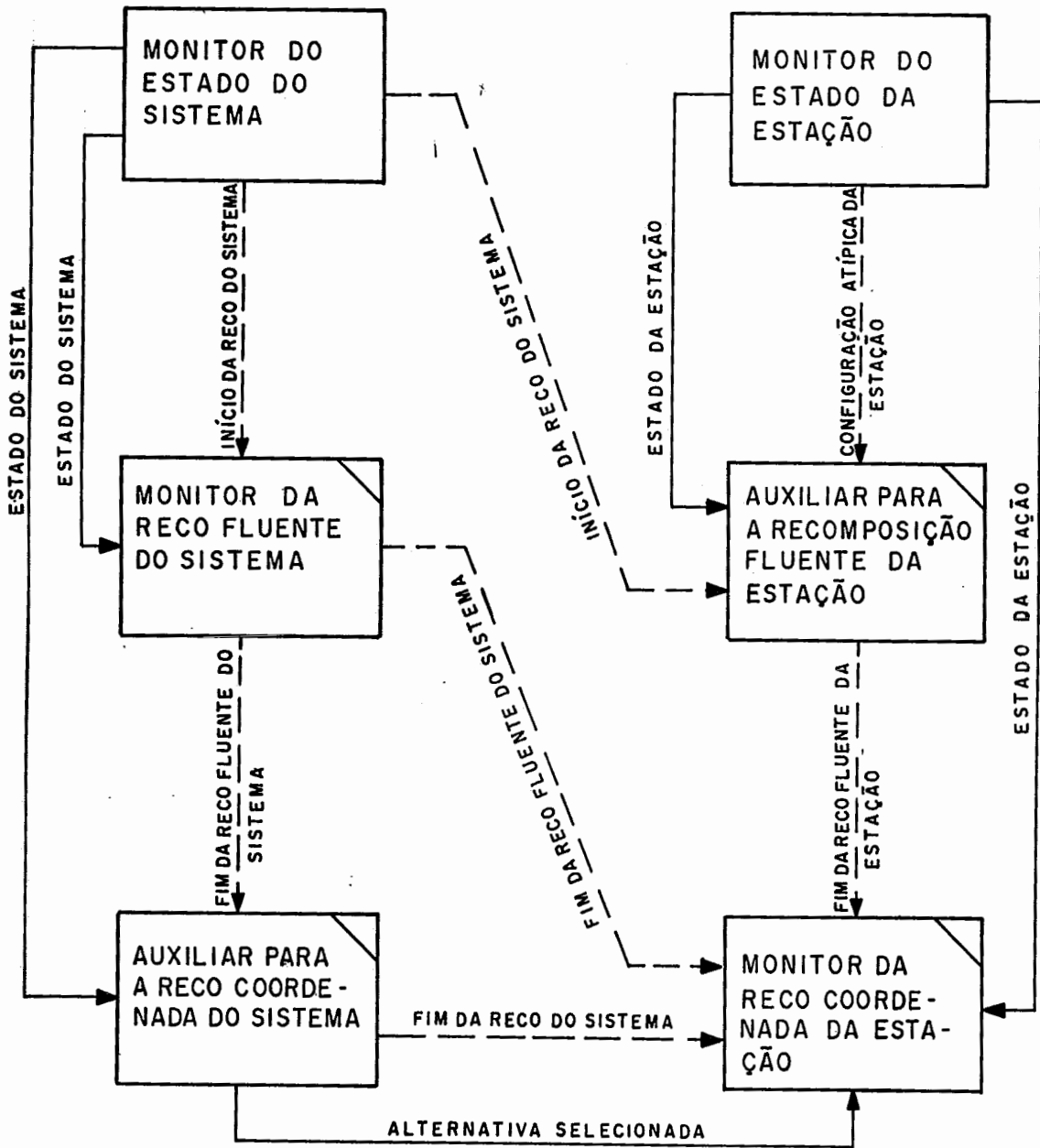


Fig.V.1 ARQUITETURA DO SISTEMA



- > FLUXO DE DADOS
- - -> EVENTOS
- ▣ MÓDULO BASEADO EM CONHECIMENTOS
- MÓDULO ALGORÍTMICO

Fig. V. 2 FLUXOS DE DADOS E DE EVENTOS

A ligação entre os diferentes subsistemas deve envolver redes de computadores, onde os nós podem estar localizados remotamente uns em relação aos outros.

Também não necessariamente os subsistemas das estações necessitam estar fisicamente localizados nas mesmas. Para estações não assistidas, em que não há operadores no local, a localização do subsistema dedicado pode ser o COS, um COR, ou uma estação próxima. Enfim, pode ser qualquer local onde haja pessoal de operação designado para responder pela operação da estação, através de manobras remotas por controle supervisorio.

V.5.3 Descrição Funcional do Sistema

A figura V.1 mostra os resolvedores de problemas dos níveis COS e das estações, e diferencia os resolvedores algorítmicos dos baseados em conhecimento.

A figura V.2 descreve o fluxo de dados e a sincronização entre os RPS.

Os RPs do COS são :

- o Monitor do Estado do Sistema.
- o Monitor da Recomposição Fluente do Sistema.
- o Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema.
- A Interface Homem-Máquina.

- o Controlador do Acesso à base de dados distribuída.

Os RPs de cada estação são :

- o Monitor do Estado da Estação.
- o Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação.
- o Monitor da Recomposição Coordenada da Estação.
- a Interface Homem-Máquina.
- o Controlador do Acesso à base de dados distribuída.

Os resolvedores de problemas algorítmicos são executados assincronamente, em qualquer estado do sistema elétrico.

Os resolvedores de problemas baseados em conhecimento são executados apenas durante o estado restaurativo, e de acordo com a fase de recomposição. Alguns são dedicados à fase fluente, outros à fase coordenada.

V.5.3.1 Os Resolvedores de Problemas Algorítmicos

O Monitor do Estado do Sistema é composto basicamente das funções de Configuração da Rede e Estimação de Estado.

O Monitor do Estado do Sistema acessa da base de dados distribuída os seguintes dados brutos de tempo real :

- estados de chaves e disjuntores do sistema elétrico.
- telemedições de potência ativa e reativa e tensões do sistema elétrico.

A partir desses dados, são produzidos então:

- listas de equipamentos desenergizados.
- sumário das ilhas elétricas do sistema, e indicação se as ilhas estão desenergizadas.
- estado mais provável do sistema, traduzido em tensões e potências ativa e reativa estimadas em todos os equipamentos do sistema.
- sumário das violações de tensão e carregamento nos equipamentos do sistema.
- indicação se o sistema se encontra no estado restaurativo, de acordo com determinado critério. Por exemplo, se o sistema está dividido em ilhas, ou se alguma área está desenergizada.

O algoritmo de Estimação de Estado deve ter a capacidade de obter o estado elétrico mais provável para todas as ilhas elétricas do sistema, fornecendo ao despachante um conjunto de grandezas elétricas coerentes entre si, e bem mais confiáveis que as medições.

Se o Monitor do Estado do Sistema julga que o sistema se encontra no estado restaurativo, aciona o Monitor da Recomposição Fluente do Sistema e cada Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação, através do evento INICIO DA

RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA.

O Monitor do Estado da Estação é composto de uma função de Configuração da Estação e de outra de Modelagem da Medição.

Enquanto a função de Configuração da Estação realiza tarefa similar à função de Configuração da Rede, só que limitada à estação, a função de Modelagem da Medição apenas associa as medições aos equipamentos.

O Monitor do Estado da Estação acessa da base de dados distribuída os seguintes dados brutos de tempo real :

- estados de chaves e disjuntores da estação.
- telemedições de potência ativa e reativa e tensões em equipamentos da estação.

Os seguintes resultados são produzidos:

- lista de equipamentos desconectados da estação.
- sumário dos ilhamentos na estação.
- indicação se a estação se encontra com configuração característica do estado restaurativo, de acordo com determinado critério. Por exemplo, se a estação está dividida, ou se uma carga ou linha de interligação está desconectada.

O estado restaurativo não pode ser bem caracterizado apenas pela configuração de uma estação. Se o Monitor do Estado da Estação detecta uma configuração atípica, aciona o Auxiliar para

Recomposição Fluente da Estação, através do evento CONFIGURAÇÃO ATÍPICA DA ESTAÇÃO.

V.5.3.2 Os Resolvedores de Problemas Baseados em Conhecimento para a Recomposição Fluente

Durante a etapa de recomposição fluente, cabe aos operadores das estações a iniciativa de promover a recomposição das mesmas, de acordo com as instruções de operação para este fim.

Cabe aos despachantes e engenheiros do COS acompanhar as ações dos operadores, intervindo apenas quando julgarem necessário ou se solicitados a isso pelos operadores.

O Monitor da Recomposição Fluente do Sistema pode ser acionado dos seguintes modos:

- manualmente pelo despachante.
- automaticamente pelo Monitor do Estado do Sistema, através do evento INICIO DA RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA.

O Monitor da Recomposição Fluente do Sistema tem como atribuição básica monitorar o processo de recomposição fluente do sistema, avaliando continuamente o estado do sistema, detetando e alertando o despachante sobre situações anormais na recomposição fluente.

A atuação deste módulo se daria, a cada passo da recomposição fluente, através da execução do seguinte ciclo de atividades:

- acesso aos dados processados pelo Monitor do Estado da Sistema.
- avaliação do estado do sistema e apresentação de síntese ao despachante.

As seguintes conclusões podem ser obtidas pelo monitor:

- o monitor conclui que o sistema está sendo recomposto como planejado.
- o monitor conclui que o sistema não está sendo recomposto como planejado, e alerta o despachante para os desvios detetados.
- o monitor conclui que o sistema está totalmente recomposto na etapa fluente, ou seja, o estado atual é idêntico ao padrão final estabelecido para o estado do sistema.

A última conclusão causa o término da execução do Monitor da Recomposição Fluente do Sistema. Ao encerrar sua execução, este envia um evento FIM DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA para o Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema, e para cada Monitor da Recomposição Coordenada da Estação.

O Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação pode ser acionado dos seguintes modos:

- manualmente pelo operador da estação.

- automaticamente pelo Monitor do Estado da Estação, e pelo Monitor do Estado do Sistema, através do e-lógico dos eventos CONFIGURAÇÃO ATÍPICA DA ESTAÇÃO e INÍCIO DA RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA.

O Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação tem como atribuição avaliar continuamente o estado da estação e propor alternativas de ação para o operador, que pode decidir por segui-las ou não.

A atuação deste módulo se daria, a cada passo da recomposição fluente, através da execução do seguinte ciclo de atividades:

- acesso aos dados processados pelo Monitor do Estado da Estação.
- avaliação do estado da estação e proposição de alternativas ao operador.

As seguintes conclusões podem ser obtidas pelo auxiliar:

- o auxiliar chega a um conjunto de alternativas possíveis, e as apresenta ao operador.
- o auxiliar não é capaz de propor, por limitação própria de sua base de conhecimentos, nenhuma alternativa viável.
- o auxiliar não consegue propor, devido a impedimentos de equipamentos da estação, nenhuma alternativa viável para a continuação da recomposição fluente, e alerta o operador sobre as condições impeditivas para a recomposição.

- o auxiliar conclui que a etapa de recomposição fluente terminou.

A primeira conclusão implica na continuação da execução do auxiliar. As duas conclusões seguintes correspondem a um impasse, que seria resolvido pela experiência operativa dos operadores da estação ou pelo auxílio dos despachantes do sistema, e poderia indicar a necessidade de enriquecer ou completar a base de conhecimentos do auxiliar.

A última conclusão causa o término da execução do Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação. Ao encerrar sua execução, este envia um evento FIM DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO, para o Monitor da Recomposição Coordenada da Estação.

V.5.3.3 Os Resolvedores de Problemas Baseados em Conhecimento para a Recomposição Coordenada

Na etapa de recomposição coordenada, a tomada de decisão cabe aos despachantes do COS. Os operadores das usinas e subestações recebem e executam ordens de ação, comunicando aos despachantes quaisquer impedimentos para execução de uma ordem.

O Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema pode ser acionado dos seguintes modos:

- manualmente pelo despachante.
- automaticamente pelo Monitor da Recomposição Fluente do

Sistema, através do evento FIM DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA.

O Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema tem como atribuição avaliar continuamente o estado do sistema e propor alternativas de ação ao despachante, que pode decidir por segui-las ou não.

A atuação do auxiliar se daria, a cada passo da recomposição coordenada, através da execução do seguinte ciclo de atividades:

- acesso aos dados processados pelo Monitor do Estado da Sistema.
- avaliação do estado do sistema e proposição de alternativas de ação ao despachante.

As seguintes conclusões podem ser obtidas nessa atividade:

- o auxiliar chega a um conjunto de alternativas possíveis, e as apresenta ao despachante.
- o auxiliar não é capaz de propor, por limitação própria de sua base de conhecimentos, nenhuma alternativa viável.
- o auxiliar conclui que a etapa de recomposição coordenada terminou.

A última conclusão acarreta o término da execução do Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema.

Ao concluir pelo término de sua execução, o auxiliar envia um evento FIM DA RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA para cada Monitor da

Recomposição Coordenada da Estação.

O Monitor da Recomposição Coordenada da Estação pode ser acionado dos seguintes modos:

- manualmente pelo operador.
- automaticamente pelo Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação, e pelo Monitor da Recomposição Fluente do Sistema, através do e-lógico dos eventos FIM DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO e FIM DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA.

O Monitor da Recomposição Coordenada da Estação tem como atribuição básica monitorar o processo de recomposição coordenada da estação, avaliando continuamente o estado do estação, e avaliando a viabilidade de cada alternativa de ação enviada pelo Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema, alertando o operador sobre a impossibilidade de execução de uma alternativa.

A atuação do monitor se daria, a cada passo da recomposição coordenada, através da execução do seguinte ciclo de atividades:

- acesso aos dados processados pelo Monitor do Estado da Estação.
- acesso à alternativa de ação enviada pelo Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema.
- avaliação do estado da estação e da viabilidade da alternativa.

As seguintes conclusões podem ser obtidas pelo monitor:

- o monitor conclui que a alternativa é viável, e comunica a conclusão ao operador, acrescida de informações para a execução da alternativa.

- o monitor conclui que a alternativa não é viável, e comunica as razões ou impedimentos ao operador, que deverá sanar tais dificuldades ou comunicar ao COS.

- o monitor não consegue concluir, por limitação própria de sua base de conhecimentos, se a alternativa proposta é viável.

A execução do monitor termina quando este recebe do Auxiliar para Recomposição Coordenada do Sistema um evento de FIM DA RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA.

VI. Um Protótipo de Sistemas Especialistas para Auxílio à Recomposição

VI.1 Introdução

A proposta formulada no capítulo anterior de um Sistema Distribuído Híbrido para Auxílio à Recomposição apresenta uma série de dificuldades e alternativas para sua viabilização.

Questões ligadas ao hardware e à arquitetura de software baseada no modelo de "blackboard" necessitam de uma investigação mais profunda para determinar requisitos que viabilizem a proposta.

Do ponto de vista da utilização de sistemas baseados em conhecimento, além dos aspectos de tempo e de robustez necessários à utilização em tempo-real, que são reforçados pela gravidade do problema da recomposição, o aspecto da modelagem é fundamental e merece uma exposição mais detalhada.

Uma proposta de modelagem do problema da recomposição como um sistema baseado em conhecimentos, mesmo que não considere todos os aspectos do problema, é importante para verificar a viabilidade e a adequação do processamento simbólico ao problema da recomposição.

Com este objetivo, foram desenvolvidas versões iniciais de protótipos para dois dos quatro resolvidores de problemas baseados em conhecimento propostos no capítulo anterior.

Como forma de tratar aspectos ligados ao processamento tanto ao nível do Centro de Operação do Sistema como ao nível das estações, e de modelar tanto módulos para monitoração como módulos para auxílio, optou-se por desenvolver protótipos para a fase fluente.

Assim foram desenvolvidos em linguagem simbólica esboços de protótipos para os módulos Monitor da Recomposição Fluente do Sistema, e Auxiliar para a Recomposição Fluente da Estação.

Para esses desenvolvimentos, foram utilizadas a linguagem simbólica TURBO-PROLOG versão 2.0, e acessoriamente o TURBO-C, disponíveis para micros pessoais PC-XT/AT.

A opção pelo TURBO-PROLOG se deveu tanto à fácil disponibilidade da linguagem, como a características importantes da mesma. Algumas dessas características merecem destaque:

- O mecanismo de encadeamento regressivo, fornecido pela linguagem, parece ser mais conveniente para o problema da recomposição que outros encadeamentos.
- a linguagem dispõe de recursos poderosos para tratamento de listas, que são estruturas muito adequadas para a modelagem do problema.
- a linguagem apresenta grande capacidade de abstração de dados, através dos objetos compostos, e a capacidade de misturar objetos compostos a listas abre uma perspectiva ampla para representação de entidades complexas.
- a linguagem fornece poderoso mecanismo de "backtracking",

assim como recursos para controle desse mecanismo, como os predicados "cut" e "fail", o que permite a construção de mecanismos de inferência particularmente adequados ao problema.

Uma completa abordagem do TURBO-PROLOG se encontra nos manuais do Usuário e de Referência da Borland [68,69]. Townsend, C. [18c] apresenta uma obra bastante didática para a iniciação na linguagem. Um texto mais genérico, bastante importante para o entendimento do PROLOG, é o de Cuadrado e Cuadrado [70].

O tópico seguinte apresenta um cenário utilizado para desenvolvimento e testes dos protótipos. Este cenário é composto de um sistema elétrico, e de uma instrução de operação para recomposição fluente do mesmo.

Os próximos tópicos apresentam os conceitos utilizados na modelagem dos problemas e a arquitetura dos protótipos.

VI.2 Um Cenário para a Recomposição Fluente

De acordo com a filosofia distribuída de recomposição exposta no capítulo III, na fase fluente o sistema interligado é recomposto por áreas isoladas, por iniciativa dos operadores das estações. Na fase coordenada, de acordo com ordens de ação dos despachantes do COS, essas áreas recompostas são reconectadas entre si, e o sistema como um todo é restabelecido.

A figura VI.1 apresenta um cenário utilizado para

desenvolvimento e testes dos protótipos.

O sistema elétrico representado na figura corresponde a uma das áreas em que é dividido um sistema interligado para recomposição fluente. Esta área baseia-se na área Minas-São Paulo definida para recomposição fluente do Sistema Interligado Sudeste-Sul [24,25]. Foram feitas algumas simplificações na topologia da área, e algumas alternativas foram acrescentadas à instrução de operação para recomposição fluente da área, para testar melhor os protótipos.

A instrução de operação para recomposição fluente dessa área é apresentada a seguir:

1) Usina USLC

1.1) Sincronizar pelo menos 4 unidades geradoras com 12.4 kv na barra de geração.

1.2) Enviar tensão para UHJG, pela linha JG-LC.

1.3) Enviar tensão para UHVG, pela linha LC-VG.

1.4) Enviar tensão para USFU, pela linha FU-LC.

1.4a) Em caso de impedimento na linha, continuar a recomposição fluente.

1.5) Enviar tensão para STPC, pela linha LC-PC, circuito 1 ou 2.

1.5a) Em caso de impedimento nas linhas, fim da recomposição fluente.

2) Usina USFU

2.1) sincronizar no mínimo 4 unidades geradoras com 13.5 kv na barra de geração.

2.2) enviar tensão para SEPI, pela linha FU-PI.

2.3) Recebendo tensão de USLC pela linha FU-LC, fechar o paralelo.

2.3a) Em caso de impedimento na linha, continuar o procedimento.

2.4) Ao verificar fluxo de potência ativa na linha FU-PI, enviar tensão para STPC, pela linha FU-PC, circuito 1 ou 2.

2.4a) Em caso de impedimento nas linhas, fim da recomposição fluente.

3) Subestação STPC

3.1) Recebendo tensão de USLC e de USFU, fechar o anel ou paralelo.

3.1a) Em caso de impedimento das linhas de USLC, receber tensão apenas de USFU.

3.1b) Em caso de impedimento das linhas de USFU, receber tensão apenas de USLC.

3.2) Enviar tensão para STGA, pela linha GA-PC, circuito 1 ou 2.

3.2a) Em caso de impedimento nas linhas para STGA, continuar o procedimento.

4) Subestação STGA

4.1) Recebendo tensão de STPC, enviar tensão para ETNO, pela linha GA-NO.

4.1a) Em caso de impedimento nas linhas GA-PC, continuar o procedimento.

5) Subestação ETNO

5.1) Recebendo tensão de STGA, restabelecer imediatamente até 100 mw de carga.

5.2) Em caso de impedimento na linha, fim da recomposição fluente da estação.

6) Subestação STPC

6.1) Verificando-se fluxo na linha para STGA, restabelecer até 70 mw de carga, e enviar tensão para STCA, pela linha CA-PC.

6.1a) Em caso de impedimento na linha para STGA, enviar primeiro tensão para STCA, verificar fluxo na linha e então restabelecer carga.

7) Subestação STCA

7.1) Recebendo tensão de STPC, enviar tensão para STGA, pela linha GA-CA.

8) Subestação STGA

8.1) Receber tensão de STCA (quando há impedimento nas linhas de

STPC, a estação é energizada por essa linha) .

9) Usina USLC

9.1) A partir de 100 mw de carregamento na linha para STPC, enviar tensão pelo outro circuito.

10) Usina USFU

10.1) A partir de 100 mw de carregamento na linha para STPC, enviar tensão pelo outro circuito.

11) Subestação STPC

11.1) Recebendo tensão dos segundos circuitos de USFU e USLC, enviar tensão para STGA pela linha GA-PC, segundo circuito.

11.1a) Recebendo tensão apenas do segundo circuito de USFU, enviar tensão para STGA pela linha GA-PC, segundo circuito.

11.1b) Recebendo tensão apenas do segundo circuito de USLC, enviar tensão para STGA pela linha GA-PC, segundo circuito.

12) Subestação STGA

12.1) Recebendo tensão de STPC pelo segundo circuito, enviar tensão para ETNE, pela linha GA-NE.

13) Subestação ETNE

13.1) Recebendo tensão de STGA, restabelecer até 100 mw de carga.

Esta instrução apresenta um plano preferencial e algumas alternativas para a possibilidade de ocorrência das seguintes falhas permanentes :

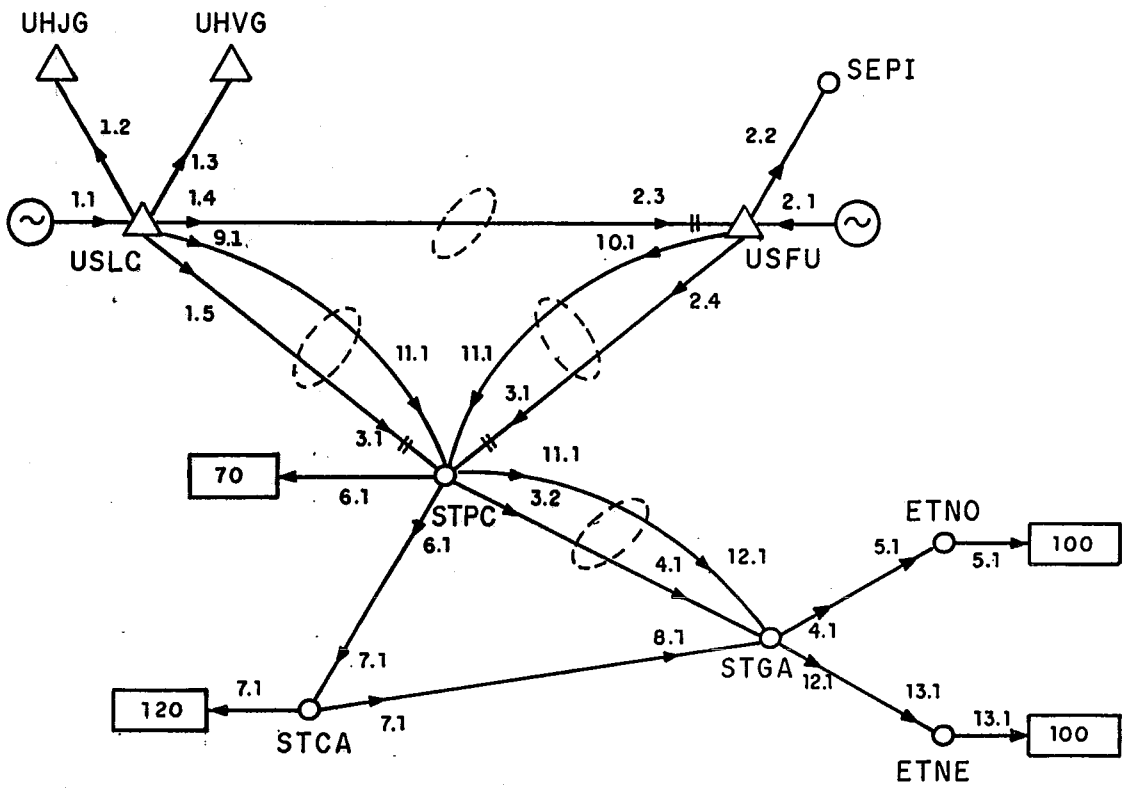
- falha da linha FU-LC, entre USFU e USLC.
- falha dupla das linhas LC-PC, entre USLC e STPC.
- falha dupla das linhas FU-PC, entre USFU e STPC.
- falha dupla das linhas GA-PC, entre STPC e STGA.

Assim, por exemplo, se há falha dupla nas linha LC-PC, os passos 3.1 e 11.1 são substituídos pelas alternativas 3.1a e 11.1a .

A ocorrência de falhas em outras linhas provoca impedimentos no procedimento de recomposição fluente, devido a não terem sido previstas alternativas para isso.

Uma observação importante é que embora a instrução tal como foi descrita indique uma sequência no procedimento, há uma simultaneidade possível entre alguns passos. Por exemplo, os passos 1.1 a 1.4 podem ser executados simultaneamente aos passos 2.1 a 2.2.

A instrução de operação para recomposição de uma determinada estação é formada pelos itens da instrução acima que dizem respeito à estação. Por exemplo, a instrução de operação para a recomposição fluente de STPC seria formada pelos itens 3, 6, e 11.



- LINHAS COM POSSIBILIDADE DE FALHA
 - || FECHAMENTO DE ANEL OU PARALELO
 - SENTIDO DE ENVIO DE TENSÃO
 - △ USINA
 - ⊖ UNIDADE GERADORA
 - SUBESTAÇÃO
 - CARGA
- N.N PASSO DA INSTRUÇÃO DE OPERAÇÃO

Fig. VI.1 CENÁRIO PARA DESENVOLVIMENTO E TESTES DOS PROTÓTIPOS.

VI.3 Protótipo do Monitor da Recomposição Fluente do Sistema

O Monitor da Recomposição Fluente do Sistema teria como atribuição auxiliar o despachante a monitorar a fase fluente da recomposição.

Sua tarefa básica seria acompanhar o processo de recomposição de cada uma das áreas elétricas pré-definidas para recomposição fluente.

Esta tarefa seria efetuada pela comparação da configuração corrente das áreas com a configuração final programada. A fase de recomposição fluente estaria terminada quando todas as áreas tivessem atingido a meta final de configuração.

Esta abordagem para o problema confere à monitoração da recomposição fluente do sistema características de um problema de reconhecimento de padrões.

Algumas opções para o modo de comparação poderiam ser consideradas:

- o Monitor poderia acompanhar a evolução do processo de recomposição, comparando a configuração corrente com diversas configurações intermediárias para o processo.
- o Monitor só compararia a configuração corrente com a configuração final, ou seja, não acompanharia o processo de recomposição, apenas verificaria se as metas finais já foram atingidas.

Outras opções não se referem a como monitorar, mas sim a o que monitorar. Haveria então mais duas opções :

- só seriam monitoradas as gerações e as cargas, considerando que a recomposição da malha de transmissão é apenas um meio para se restabelecer o fluxo de energia das gerações em direção às cargas, e que se as cargas estão restabelecidas então o sistema de transmissão foi recomposto de forma a atender a este objetivo.

- seriam monitoradas as gerações, cargas e o sistema de transmissão, considerando que a forma como a malha de transmissão é restabelecida é importante para a segurança do sistema, bem como para a próxima fase, de recomposição coordenada.

Um aspecto que não deixa margem para opções é que não haveria na realidade uma configuração final programada, mas um conjunto de configurações finais aceitáveis, como alternativas em caso de indisponibilidade de equipamentos. Neste caso, uma solução para o problema deveria obrigatoriamente poder reconhecer todos estes padrões finais aceitáveis.

Embora pareça claro que a melhor opção é acompanhar a evolução do processo de recomposição de todos os equipamentos, inclusive da malha de transmissão, uma aproximação que permita ao usuário escolher as opções mais adequadas segundo seu próprio critério é bastante atraente.

O protótipo desenvolvido permite essa flexibilidade.

A seguir são apresentados os conceitos utilizados e a

arquitetura do protótipo, utilizando-se a título de ilustração a área representada na figura VI.1.

VI.3.1 Formulação Conceitual

O Monitor da Recomposição Fluente do Sistema monitora a recomposição isolada de cada área em que é dividido previamente o sistema para a recomposição fluente. A atuação do Monitor só termina quando todas as áreas estão recompostas, indicando que a fase fluente se encerrou.

A aproximação utilizada é decompor o problema da monitoração de uma área em sub-problemas mais simples de monitoração de áreas menores, denominadas sub-áreas.

Assim, cada área é subdividida em sub-áreas, do mesmo modo que um grafo pode ser dividido em sub-grafos. Estas sub-áreas não necessitam ser disjuntas.

Uma área é considerada recomposta quando todas as sub-áreas definidas para esta área estão recompostas.

A forma de se definir estas sub-áreas determina se a monitoração irá acompanhar a evolução do processo de recomposição, ou se irá apenas determinar se a área chegou a uma configuração final.

A figura VI.2 apresenta a divisão da área da figura VI.1 em sub-áreas que são formadas em sequência, de acordo com a evolução do procedimento de recomposição da área, descrito

anteriormente. Isto confere à monitoração da área um aspecto sequencial e evolutivo, permitindo o acompanhamento das etapas intermediárias do processo. Excetuando-se as sub-áreas 1 e 2, que podem ser formadas ao mesmo tempo, as outras necessitam ser formadas em sequência.

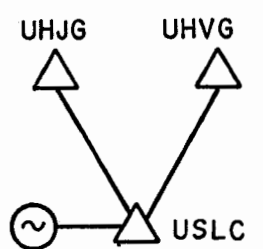
Uma outra forma de divisão em sub-áreas poderia levar em conta a topologia final, dividindo a área em sub-áreas disjuntas com configuração final.

Na resolução do sub-problema de monitoração de uma sub-área, para levar em consideração diversas configurações aceitáveis para a sub-área, cada configuração distinta é denominada alternativa.

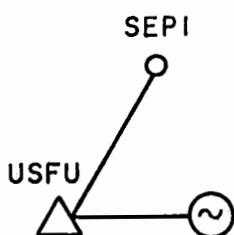
Assim, o problema da monitoração de uma sub-área é decomposto na monitoração das alternativas da sub-área, onde cada alternativa é descrita como um conjunto de estações e equipamentos conectados entre si. A opção pela monitoração do sistema de transmissão é implementada pela inclusão das linhas de transmissão na descrição das alternativas.

A monitoração de uma sub-área consiste portanto na monitoração de cada uma das alternativas da sub-área. Se uma das alternativas é reconhecida, a sub-área é considerada recomposta.

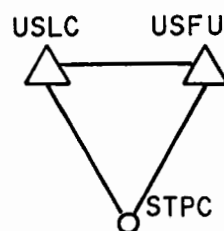
A figura VI.3 apresenta as alternativas das sub-áreas 3, 4 e 5. As demais sub-áreas apresentam uma única alternativa, que corresponde à configuração completa.



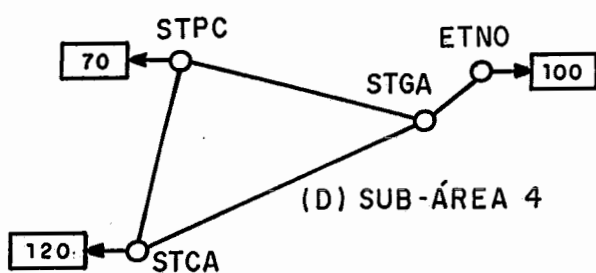
(A) SUB-ÁREA 1



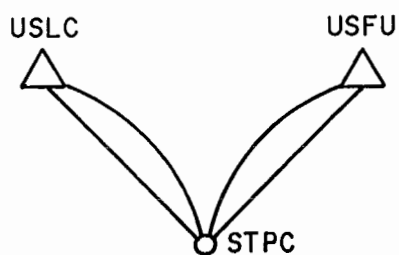
(B) SUB-ÁREA 2



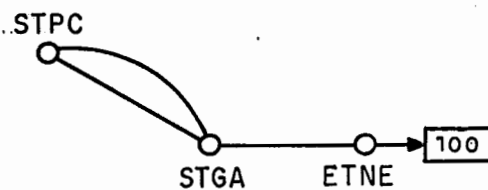
(C) SUB-AREA 3



(D) SUB-ÁREA 4

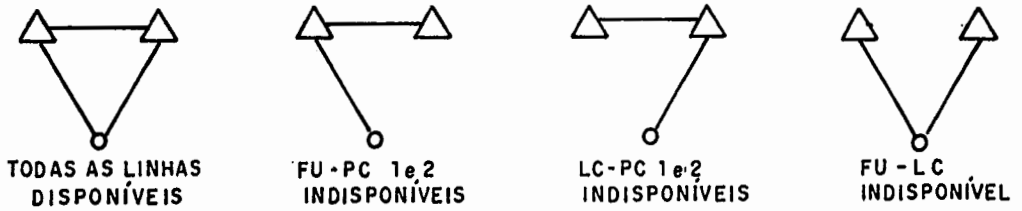


(A) SUB-ÁREA 5

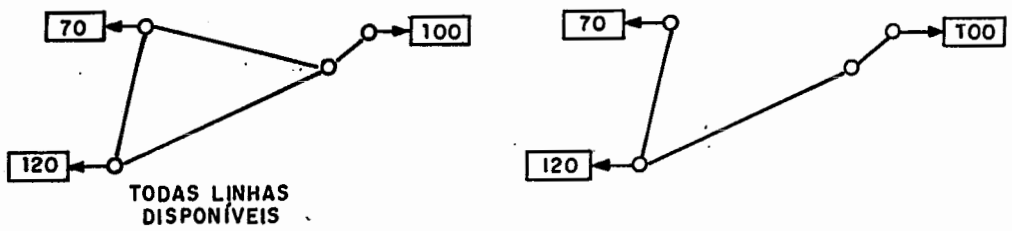


(F) SUB-ÁREA-6

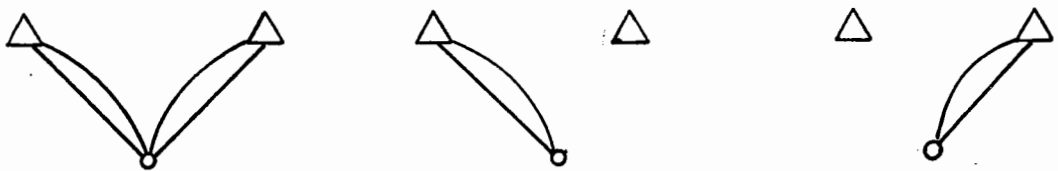
Fig. VI. 2 DIVISÃO DA ÁREA PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE EM SUB-ÁREAS



(A) ALTERNATIVAS DA SUB-ÁREA 3



(B) ALTERNATIVAS DA SUB-ÁREA 4



(C) ALTERNATIVAS DA SUB-ÁREA 5

Fig. VI 3 ALTERNATIVAS PARA AS SUB-ÁREAS

VI.3.2 Arquitetura do Protótipo

A arquitetura definida para o protótipo é apresentada na figura VI.4a. O Monitor da Recomposição Fluente do Sistema é estruturado como um sistema especialista, sendo formado por um Mecanismo de Inferência, pela Base de Conhecimentos, e por uma Interface com o Usuário.

O Simulador do Estado do Sistema, em linha tracejada, não foi desenvolvido, mas seria essencial como forma de dar maior flexibilidade na simulação de um conjunto de cenários, gerando vários arquivos distintos de Estado do Sistema.

Os arquivos de Estado do Sistema representam os resultados obtidos pelo Monitor do Estado do Sistema, e armazenados na base de dados distribuída, de acordo com a proposta do capítulo V.

Em lugar desse Simulador, foram utilizados para desenvolvimento e teste do protótipo alguns arquivos de Estado do Sistema preparados para simular a evolução da recomposição fluente da área da figura VI.1.

O módulo de Interface com o usuário é bem simples, e pretende substituir o módulo de Interface Homem-Máquina da proposta do capítulo V.

Uma limitação do protótipo é a necessidade de recompilação do mesmo quando a Base de Conhecimentos é alterada. Isto se deve ao fato que o TURBO-PROLOG não aceita a definição dinâmica de regras. Assim, a Base de Conhecimentos é compilada junto com o

Mecanismo de Inferência e com a Interface com o Usuário em um único programa.

Nos tópicos a seguir, um maior detalhamento da Base de Conhecimentos, do Mecanismo de Inferência e da Interface com o Usuário é apresentado.

VI.3.2.1 A Base de Conhecimentos

A figura VI.4b apresenta a composição e a atualização da Base de Conhecimentos.

A Base de Conhecimentos armazena conhecimento sobre as áreas para recomposição fluente, as sub-áreas de cada área, as alternativas de cada sub-área, e o conjunto de estados de equipamentos descritivos da configuração assumida em cada alternativa.

Esta formulação para o problema da monitoração da recomposição fluente do sistema é claramente hierárquica.

O módulo Compilador da Base de Conhecimentos não faz parte do protótipo, mas é um programa simples em TURBO-C, que seria utilizado em modo "off-line" para possibilitar ao próprio usuário a entrada e atualização do conhecimento, dispensando a necessidade de pessoal especializado em PROLOG para a manutenção da Base de Conhecimentos do protótipo.

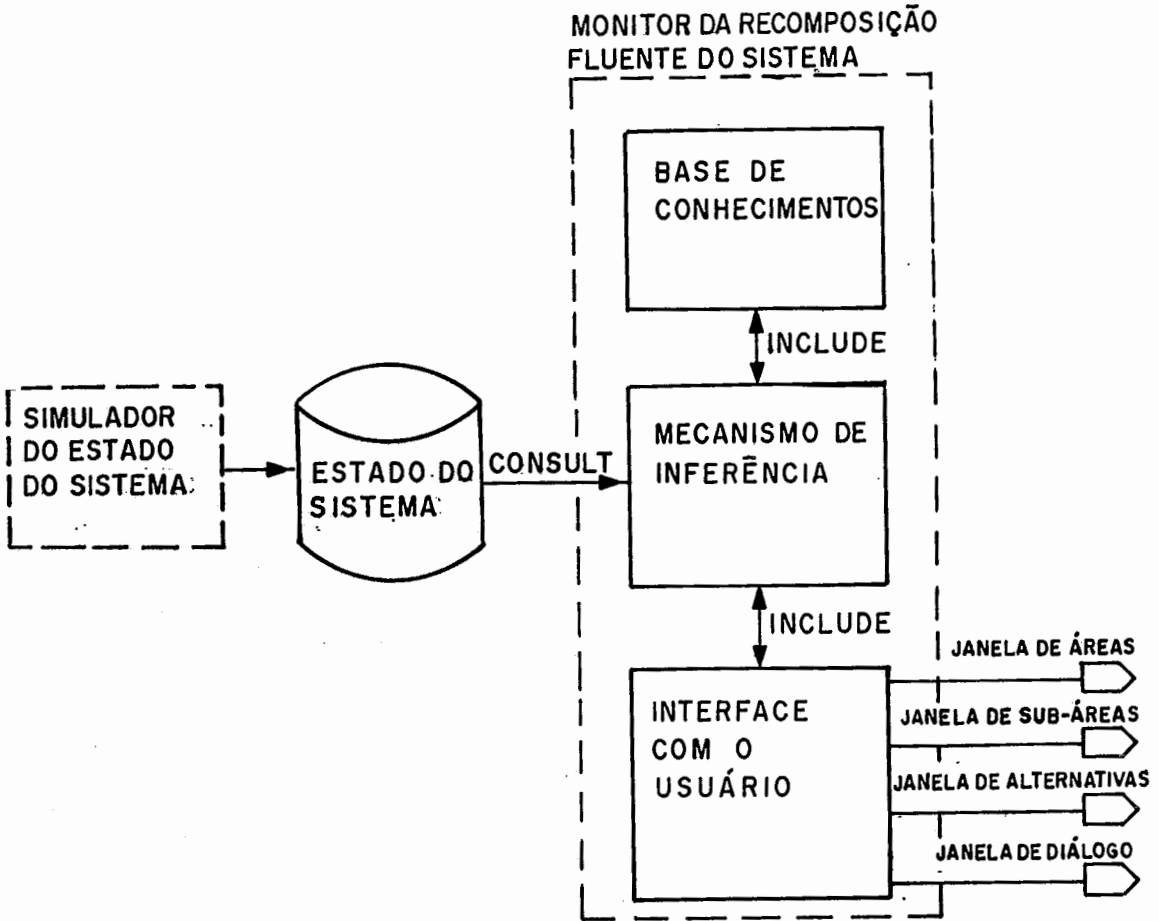


Fig. VI 4a ARQUITETURA DO PROTÓTIPO DO MONITOR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA.

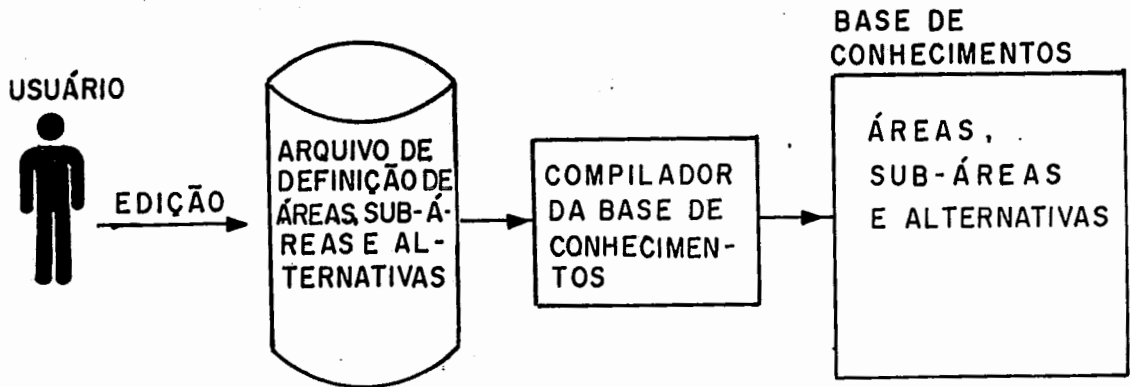


Fig. VI 4b COMPOSIÇÃO E ATUALIZAÇÃO DA BASE DE CONHECIMENTOS

Assim, o conhecimento seria atualizado através da edição de um arquivo descritivo das áreas, sub-áreas e alternativas, organizado de forma simples e hierárquica. O apêndice I apresenta o arquivo com o conhecimento necessário à monitoração da recomposição fluente da área da figura VI.1.

Este arquivo seria então "compilado" numa Base de Conhecimentos, formada por regras e fatos cuja sintaxe o usuário não precisa conhecer.

A Base de Conhecimentos correspondente ao resultado da "compilação" do arquivo do apêndice I é apresentada no apêndice II.

Os fatos "area", "sub-area" e "alternativa" são utilizados para permitir ao Mecanismo de Inferência a formação de listas de áreas, sub-áreas e alternativas.

A legibilidade da Base de Conhecimentos fica prejudicada pela limitação do PROLOG que obriga a agrupar fatos e regras com o mesmo predicado. No entanto, a orientação hierárquica é preservada pela referência aos níveis superiores nos parâmetros formais dos predicados.

Para cada alternativa, uma regra "verifica_alternativa" encabeça um conjunto de fatos "estado", aplicados a objetos compostos denominados "equipamento", que podem ser linhas de transmissão, conjunto de unidades geradoras, cargas, etc.

Estes fatos "estado" correspondem ao estado esperado para aqueles equipamentos no contexto da alternativa a ser verificada.

VI.3.2.2 O Mecanismo de Inferência

O Mecanismo de Inferência processa a Base de Conhecimentos e o Estado do Sistema em três níveis de controle: monitoração de áreas, de sub-áreas e de alternativas.

Estes níveis de controle utilizam o processamento recursivo de listas de áreas, sub-áreas de uma área, e alternativas de uma sub-área, através da aplicação do predicado interno "findall" a fatos "area", "sub-area" e "alternativa" constantes da Base de Conhecimentos.

O controle de áreas monitora as áreas ciclicamente, até que todas sejam consideradas recompostas. O estado do sistema é acessado a cada início de ciclo.

O Mecanismo de Inferência substitui o acesso à base de dados distribuída proposta no capítulo anterior pela simples incorporação de fatos descritivos do estado corrente do sistema à base de dados dinâmica do PROLOG, através do predicado interno "consult", aplicado ao Arquivo de Estado do Sistema, durante a execução da regra "acessa_estado_do_sistema", a cada início de ciclo.

O apêndice III apresenta um arquivo com o estado do sistema. Os fatos "estado" deste arquivo são aplicados ao mesmo objeto composto "equipamento" descrito para a Base de Conhecimentos. A diferença é que estes fatos representam o

estado corrente dos equipamentos, enquanto na Base de Conhecimentos eles representam o estado esperado no contexto de cada alternativa.

O Simulador do Estado do Sistema é substituído por uma regra "simula_estado_do_sistema", executada no início do ciclo de monitoração, e que alterna segundo uma lista de nomes de arquivo, os arquivos de Estado do Sistema incorporados à base dinâmica de dados.

A medida que uma área é considerada recomposta, ela é marcada como recomposta, através da inserção do fato "area_recomposta(nome_da_area)" à base de dados dinâmica do PROLOG. Isto é feito através do predicado interno "assertz".

No ciclo de monitoração de áreas, são monitoradas apenas as áreas sem esta marca. Uma aproximação mais conservativa seria continuar monitorando áreas já recompostas, supondo que enquanto outras áreas estão em recomposição, uma área já recomposta poderia sofrer um novo distúrbio, que a colocasse novamente em recomposição. A simples retirada dessa marca implementaria esta aproximação.

O controle da monitoração de sub-áreas de uma área realiza a monitoração sequencial de todas as sub-áreas. Uma área só é considerada recomposta se todas as suas sub-áreas estiverem recompostas.

Ao contrário do que acontece para as áreas, o Mecanismo de Inferência não marca quais sub-áreas de uma área já foram consideradas recompostas no ciclo anterior. Assim, enquanto uma área não estiver recomposta, todas as sub-áreas serão sempre

varridas nos ciclos subsequentes.

Esta aproximação pretende compensar a exclusão de uma área do ciclo de monitoração assim que ela é considerada recomposta. As duas aproximações partem da suposição de que uma área é mais estável totalmente recomposta do que apenas parcialmente. A alteração de marcar as sub-áreas recompostas para exclusão no próximo ciclo também é facilmente implementável.

O terceiro nível, de controle da monitoração de alternativas de uma sub-área, também monitora as alternativas em sequência. No entanto, essa sequência é interrompida, se uma alternativa é atendida. Neste caso, as demais alternativas não são monitoradas, e a sub-área é considerada recomposta.

A verificação do atendimento de uma alternativa é feita através do "casamento" entre os fatos "estado" representativos do estado esperado para os equipamentos no contexto da alternativa, e os fatos "estado" representativos do estado corrente do sistema. Se o "casamento" é bem-sucedido, a alternativa é bem-sucedida, e a sub-área correspondente é considerada recomposta.

As figuras VI.5 , VI.6 e VI.7 apresentam fluxogramas representativos dos três níveis de controle do Mecanismo de Inferência.

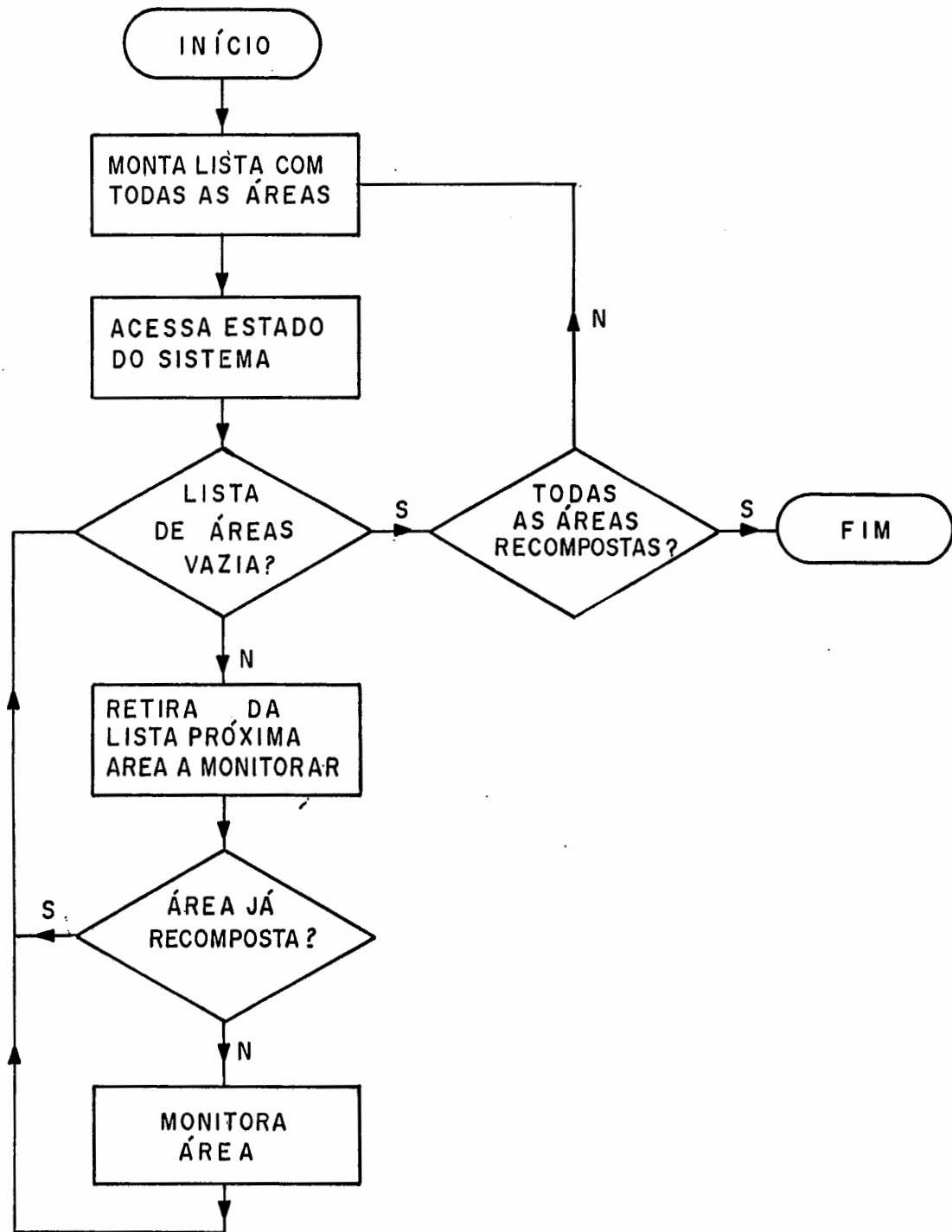


Fig. VI.5 FLUXOGRAMA DO MECANISMO DE INFERÊNCIA DO MONITOR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA - CONTROLE DA MONITORAÇÃO DE ÁREAS

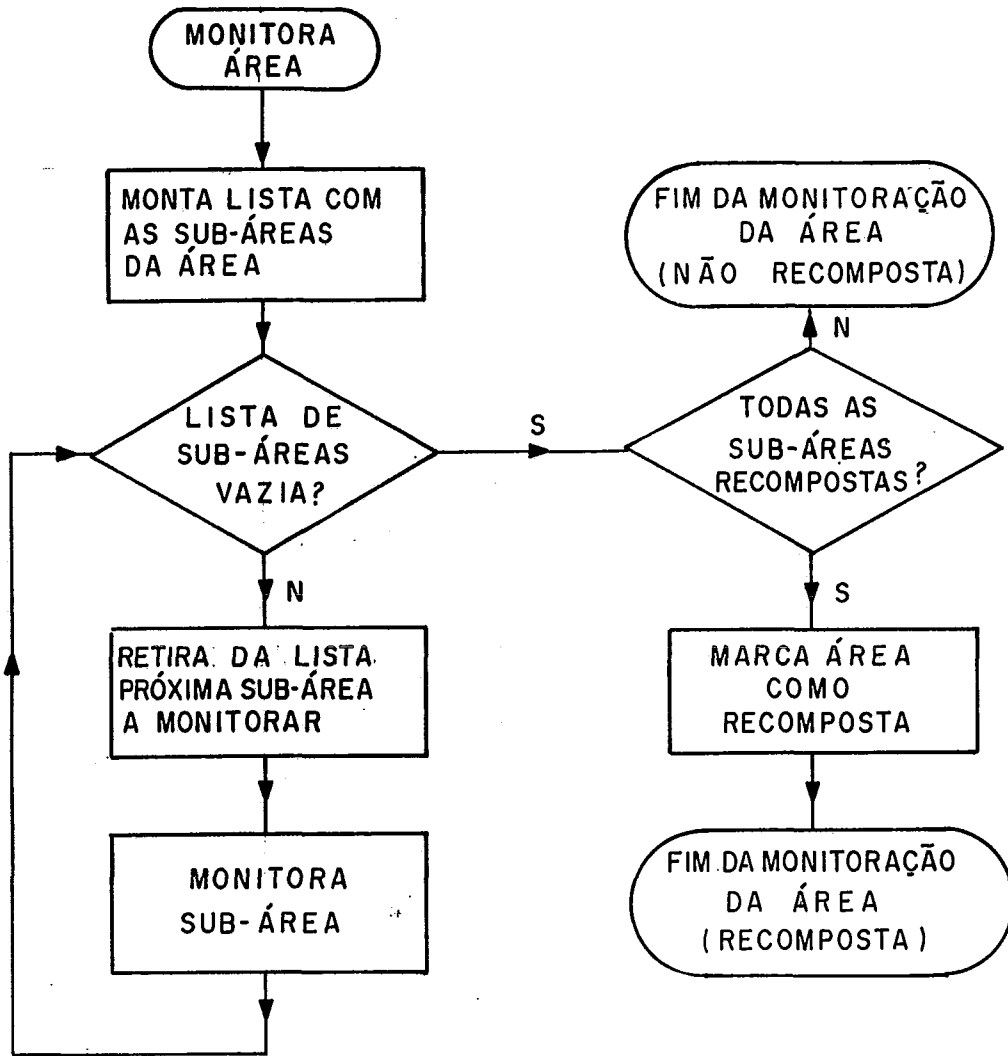


Fig. VI-6 FLUXOGRAMA DO MECANISMO DE INFERÊNCIA DO MONITOR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA - CONTROLE DA MONITORAÇÃO DE SUB-ÁREAS

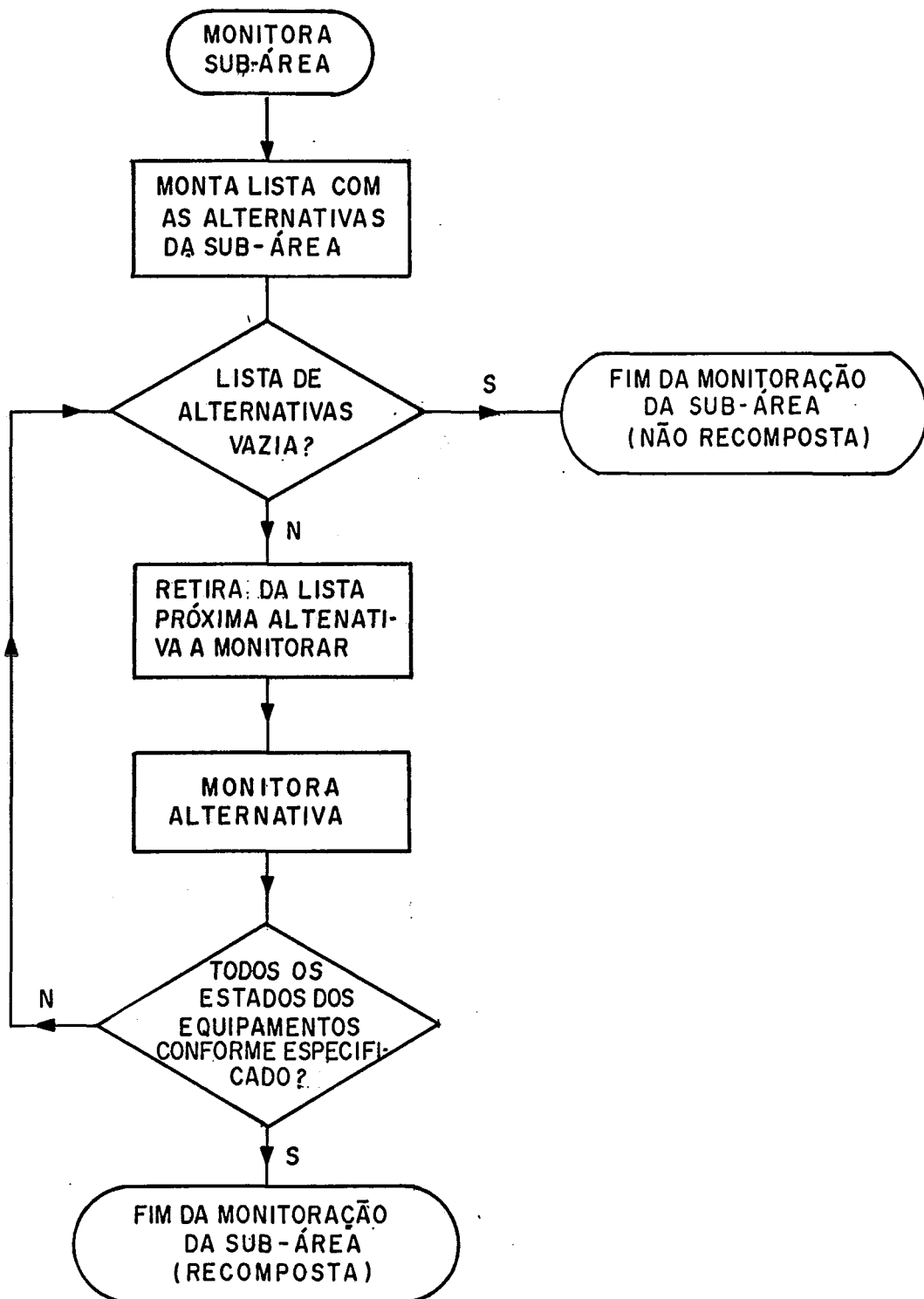


Fig. VI. 7 FLUXOGRAMA DO MECANISMO DE INFERÊNCIA DO MONITOR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA-CONTROLE DA MONITORAÇÃO DE ALTERNATIVAS

VI.3.2.3 A Interface com o Usuário

O módulo de Interface com o Usuário é bastante simples. São utilizadas as seguintes janelas :

- a janela de áreas apresenta o estado corrente para cada área, se em recomposição ou já recomposta, e destaca a área que está sendo monitorada.
- a janela de sub-áreas apresenta o estado corrente das sub-áreas da área que está sendo monitorada, e destaca a sub-área que está sendo monitorada no momento.
- a janela de alternativas apresenta o estado corrente das alternativas da sub-área que está sendo monitorada, e destaca a alternativa que está sendo verificada no momento.
- a janela de diálogo é utilizada para permitir ao usuário alterar o resultado da avaliação de cada alternativa.

A possibilidade de interferir no resultado de uma alternativa gera amplas possibilidades de teste do protótipo.

VI.4 Protótipo do Auxiliar da Recomposição Fluente da Estação

O Auxiliar da Recomposição Fluente da Estação teria como atribuição auxiliar o operador a executar a fase fluente da recomposição de sua estação.

Sua tarefa básica seria acompanhar o processo de recomposição da estação, propondo ações ao operador a cada passo da recomposição fluente, de acordo com o estado corrente da estação.

Esta tarefa seria efetuada pela execução de uma sequência de passos, onde cada passo seria composto por um conjunto de condições a serem verificadas e ações a serem propostas. A fase de recomposição fluente estaria terminada para a estação quando todos os passos estivessem cumpridos.

Duas opções para o grau de auxílio que é dado ao operador poderiam ser consideradas:

- o Auxiliar poderia verificar se o operador cumpriu sua recomendação antes de passar para o próximo passo. Este tipo de verificação seria essencial se a proposta fosse a automatização do processo.
- o Auxiliar poderia esperar pela confirmação do operador sobre o sucesso na execução das ações recomendadas para passar para o próximo passo.

Um aspecto obrigatório para o Auxiliar é que na verdade não haveria um único conjunto de ações e condições para cada passo. Alternativas são necessárias em caso de indisponibilidade de equipamentos. Assim, o auxiliar deve ser capaz de propor alternativas para se adaptar à falha de equipamentos.

Uma aproximação para o problema que permita ao auxiliar verificar se as ações recomendadas foram efetuadas, a critério do usuário, é interessante no sentido de dar uma flexibilidade ao usuário para adequar o auxiliar às suas necessidades.

O protótipo desenvolvido permite essa flexibilidade ao permitir que ações e condições sejam intercaladas em qualquer ordem definida pelo usuário.

A seguir são apresentados os conceitos utilizados e a arquitetura do protótipo, utilizando como exemplo a recomposição fluente da estação STPC, de acordo com a instrução definida para a área da figura VI.1.

VI.4.1 Formulação Conceitual

O Auxiliar para a Recomposição Fluente da Estação auxilia a recomposição isolada da estação. A atuação do Auxiliar só termina quando todos os passos para a recomposição fluente da estação foram executados com sucesso, ou no impedimento de um desses passos.

A aproximação utilizada é bastante semelhante à forma como a instrução de recomposição de uma estação é estruturada. O problema é subdividido em passos sequenciais de recomposição. O sucesso da recomposição fluente de uma estação ocorre se todo os passos forem executados com sucesso. Se um passo falha, a recomposição fluente da estação é considerada impedida, e o problema fica para ser resolvido na fase coordenada.

Cada passo da recomposição apresenta alternativas para a sua execução. Se uma das alternativas pode ser realizada, o passo é considerado bem sucedido.

Uma alternativa é formada por um conjunto de condições a serem satisfeitas e ações a serem realizadas. A não satisfação de uma condição, ou a não execução de uma ação, implicam na falha da alternativa.

A figura VI.8 representa os passos para a recomposição fluente da estação STPC, bem como as alternativas para cada passo, de acordo com a instrução de operação para recomposição fluente da área representada na figura VI.1.

As alternativas de um passo podem levar a estação a situações bastante distintas, em termos dos próximos passos a serem recomendados.

Assim, por exemplo, se a alternativa possível para o passo 2 fôr a segunda alternativa, o passo 4 não poderá ser executado, e a recomposição fluente de STPC terminará com um impedimento. Se a alternativa preferencial 1 fôr possível, não há a priori impedimento para a execução bem-sucedida do passo 4.

VI.4.2 Arquitetura do Protótipo

A arquitetura definida para o protótipo é apresentada na figura VI.9a. O Auxiliar para a Recomposição Fluente da Estação é estruturado como um sistema especialista, sendo formado por um Mecanismo de Inferência, pela Base de Conhecimentos, e por uma Interface com o Usuário.

O Simulador do Estado da Estação, assim como o seu similar Simulador do Estado do Sistema, não foi desenvolvido, mas seria

importante para a simulação de um conjunto de cenários, gerando vários arquivos distintos de Estado da Estação. Os dois simuladores deveriam ser integrados, de forma que os cenários locais gerados pelo primeiro fôssem compatíveis com os cenários globais gerados pelo último.

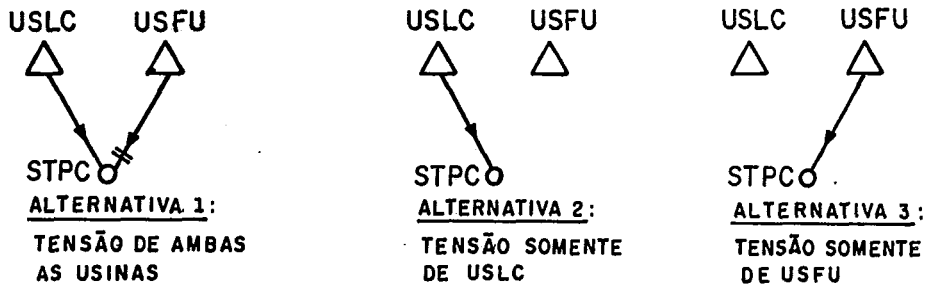
Os arquivos de Estado da Estação representam os resultados obtidos pelo Monitor do Estado da Estação, e armazenados na base de dados distribuída, de acordo com a proposta do capítulo V.

Em lugar desse Simulador, foram utilizados alguns arquivos de Estado da Estação preparados para simular a evolução da recomposição fluente da estação STPC.

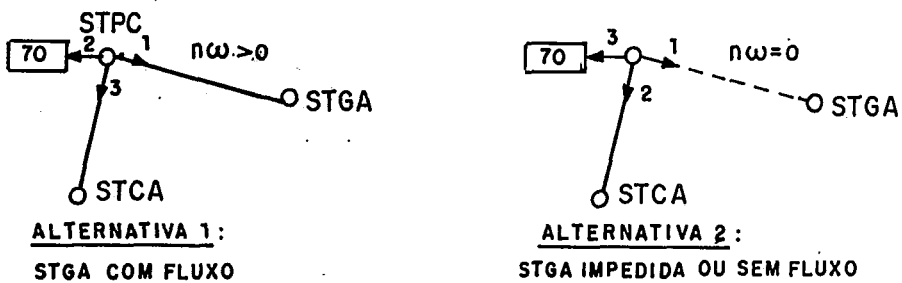
O módulo de Interface com o usuário é bastante simples, e substitui o módulo de Interface Homem-Máquina da proposta do capítulo V.

Analogamente ao que ocorre com o Monitor da Recomposição Fluente do Sistema, a Base de Conhecimentos do Auxiliar é compilada junto com o Mecanismo de Inferência e com a Interface com o Usuário em um único programa. Assim, devido a uma limitação do TURBO-PROLOG, a alteração da Base de Conhecimentos obriga a recompilação do programa.

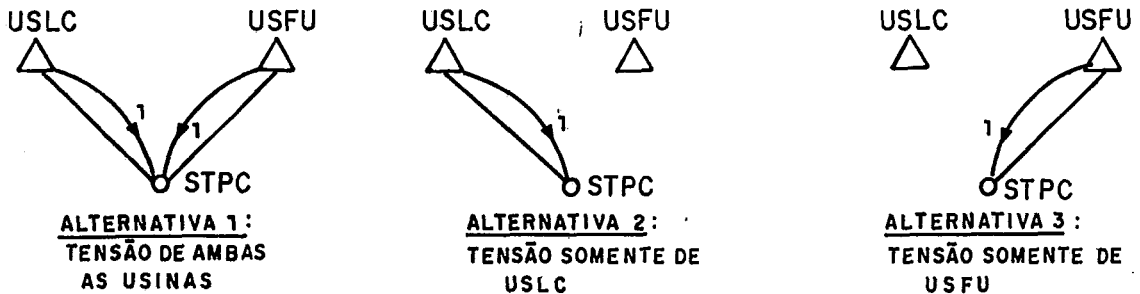
Nos tópicos a seguir, um detalhamento maior será feito para a Base de Conhecimentos, o Mecanismo de Inferência, e a Interface com o Usuário.



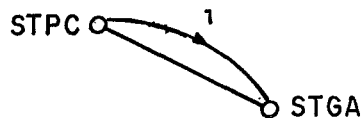
(A) PASSO 1 - RECEBIMENTO DE TENSÃO PARA ENERGIZAÇÃO



(B) PASSO 2 - ENVIAR TENSÃO PARA ENERGIZAR ESTAÇÕES VIZINHAS



(C) PASSO 3 - RECEBIMENTO DE TENSÃO DOS SEGUNDOS CIRCUITOS



ALTERNATIVA ÚNICA

(D) PASSO 4 - ENVIAR TENSÃO PARA STGA PELO SEGUNDO CIRCUITO

Fig. VI 8 PASSOS PARA A RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO STPC

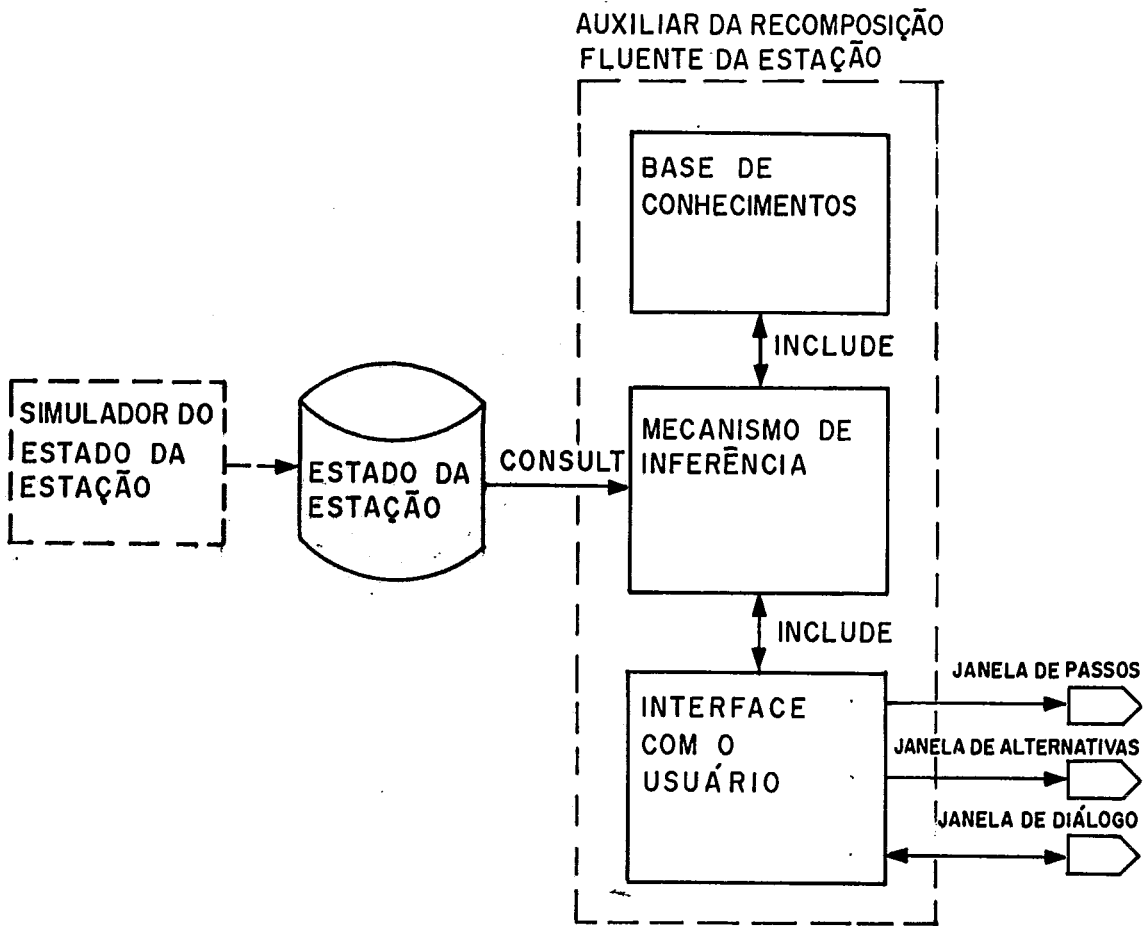


Fig.VI 9a ARQUITETURA DO PROTÓTIPO DO AUXILIAR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO

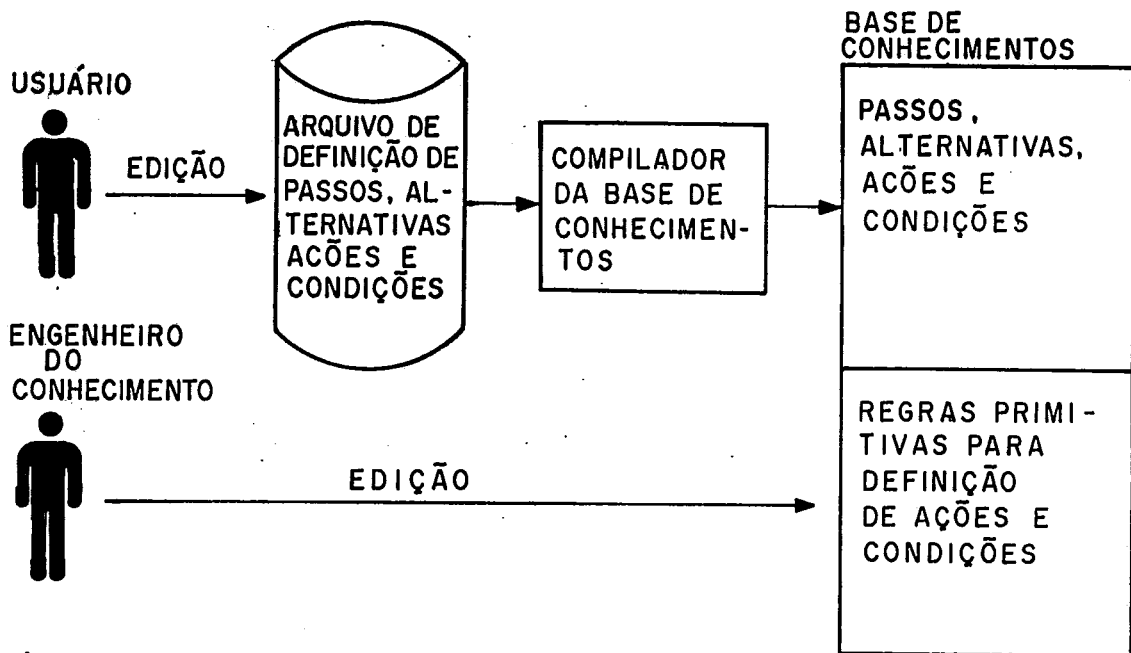


Fig.VI 9b COMPOSIÇÃO E ATUALIZAÇÃO DA BASE DE CONHECIMENTOS.

VI.4.2.1 A Base de Conhecimentos

A figura VI.9b apresenta a composição e a atualização da Base de Conhecimentos.

A Base de Conhecimentos do Auxiliar para a Recomposição Fluente da Estação é composta de duas partições :

- a base de passos, alternativas, condições e ações.
- a biblioteca de primitivas para definição de condições e ações.

A base de passos, da mesma forma que o conhecimento para o problema da monitoração da recomposição fluente do sistema, pode ser estruturada de forma hierárquica. Ela armazena conhecimento sobre os passos da recomposição fluente da estação, as alternativas para cada passo, e o conjunto de condições a serem verificadas e ações a serem recomendadas.

O módulo Compilador da Base de Conhecimentos, assim como o módulo de mesmo nome do Monitor descrito anteriormente, é um programa acessório ao protótipo, programado em TURBO-C, que tem a finalidade de possibilitar ao usuário não especializado em PROLOG definir de forma mais natural o conhecimento da base de passos.

O conhecimento da base de passos poderia ser atualizado pela edição de um arquivo descritivo dos passos, alternativas, ações e condições, organizado de forma hierárquica. O apêndice IV apresenta o arquivo com o conhecimento necessário para o

auxílio à recomposição fluente da estação STPC.

Este arquivo seria então "compilado" na primeira partição da Base de Conhecimentos. O apêndice V apresenta a base de passos correspondente ao resultado da "compilação" do arquivo do apêndice IV.

A segunda parte da Base de Conhecimentos corresponde a um conhecimento mais internalizado, e constitui uma biblioteca de regras para a definição de ações e condições. Pessoal com conhecimento de PROLOG, e familiar com os internos do Auxiliar seria necessário para alterar o conjunto de primitivas.

O apêndice VI descreve um conjunto de primitivas codificadas para a recomposição da estação STPC. Estas primitivas se aplicam também a outras estações, mas certamente o conjunto seria expandido para incluir condições e ações não encontradas na instrução de operação para recomposição fluente de STPC.

Os fatos "passo" e "alternativa" da base de passos são utilizados para permitir ao Mecanismo de Inferência a formação de listas de passos e alternativas.

Para cada alternativa, uma regra `executa_alternativa` encabeça um conjunto de predicados "ação" e "condição", que são "casados" por sua vez com as regras "condição" e "ação" definidas na biblioteca de primitivas.

As regras "condição" e "ação" da biblioteca de primitivas são aplicadas a objetos compostos denominados "tipo_de_condição" e "tipo_de_ação", e incorporam em seu corpo fatos "estado"

aplicados a objetos compostos "equipamento", associados a equipamentos como linha, carga, etc. Esses fatos correspondem ao estado esperado dos equipamentos no contexto da alternativa a ser executada.

O apêndice VII apresenta a descrição das regras "ação", "condição", e dos objetos compostos que são seus parâmetros formais, bem como dos predicados "estado".

VI.4.2.2 O Mecanismo de Inferência

O Mecanismo de Inferência processa a Base de Conhecimentos e o Estado do Sistema em dois níveis de controle: execução de passos, e execução de alternativas.

Estes níveis de controle utilizam o processamento recursivo de listas de passos de uma estação, e de alternativas de um passo, através do predicado "findall" aplicado a fatos "estação", "passo" e "alternativa" constantes da Base de Conhecimentos.

O controle de passos executa os passos sequencialmente. A estação é considerada recomposta com sucesso se todos os passos forem executados com sucesso. O estado da estação é acessado entre os passos.

O Mecanismo de Inferência substitui o acesso à base de dados distribuída proposta no capítulo anterior pela simples incorporação de fatos descritivos do estado da estação à base de dados dinâmica do PROLOG através do predicado interno "consult",

durante a execução da regra "acessa_estado_da_estação", no início de cada passo.

O apêndice VIII apresenta um arquivo com o estado da estação, onde fatos "estado" são aplicados ao mesmo objeto composto "equipamento" descrito para a Base de Conhecimentos. A diferença é que estes fatos traduzem o estado corrente dos equipamentos, enquanto na Base de Conhecimentos eles representam o estado esperado no contexto de uma alternativa.

O Simulador do Estado da Estação é substituído pela regra "simula_estado_da_estação", executada entre cada passo, e que alterna segundo uma lista de nomes de arquivo, os arquivos de Estado da Estação incorporados à base dinâmica de dados.

O segundo nível, de controle da execução de alternativas de um passo, varre as alternativas em sequência. Se uma alternativa pode ser executada, o passo é então considerado executado com sucesso, e as outras alternativas não são consideradas. Se nenhuma das alternativas puder ser executada, o passo é considerado impedido, e a recomposição fluente da estação termina com impedimento.

A execução de uma alternativa é feita através do "casamento" entre os predicados "ação" e "condição" constantes do corpo da regra "executa_alternativa" com as regras correspondentes da biblioteca de primitivas.

Essas regras por sua vez verificam estados de equipamentos através do casamento de fatos "estado" em seu corpo com os fatos "estado" representativos do estado corrente da estação.

Se todas as regras "condição" e "ação" constantes do corpo da regra "executa_alternativa" são bem-sucedidas então a alternativa é executada com sucesso, e o Mecanismo de Inferência segue para o próximo passo.

As figuras VI.10 e VI.11 apresentam fluxogramas representativos dos dois níveis de controle do Mecanismo de Inferência.

VI.4.2.3 A Interface com o Usuário

A Interface com o Usuário é bem simples. São utilizadas as seguintes janelas:

- a janela de passos apresenta o passo corrente.
- a janela de alternativas apresenta a alternativa em execução e as condições e ações já executadas.
- a janela de diálogo é utilizada para permitir ao usuário responder se a ação foi executada com sucesso, e também para alterar o resultado de um passo ou de uma alternativa.

A possibilidade de interferir tanto no resultado de um passo como no resultado de uma alternativa cria flexibilidade para teste do protótipo.

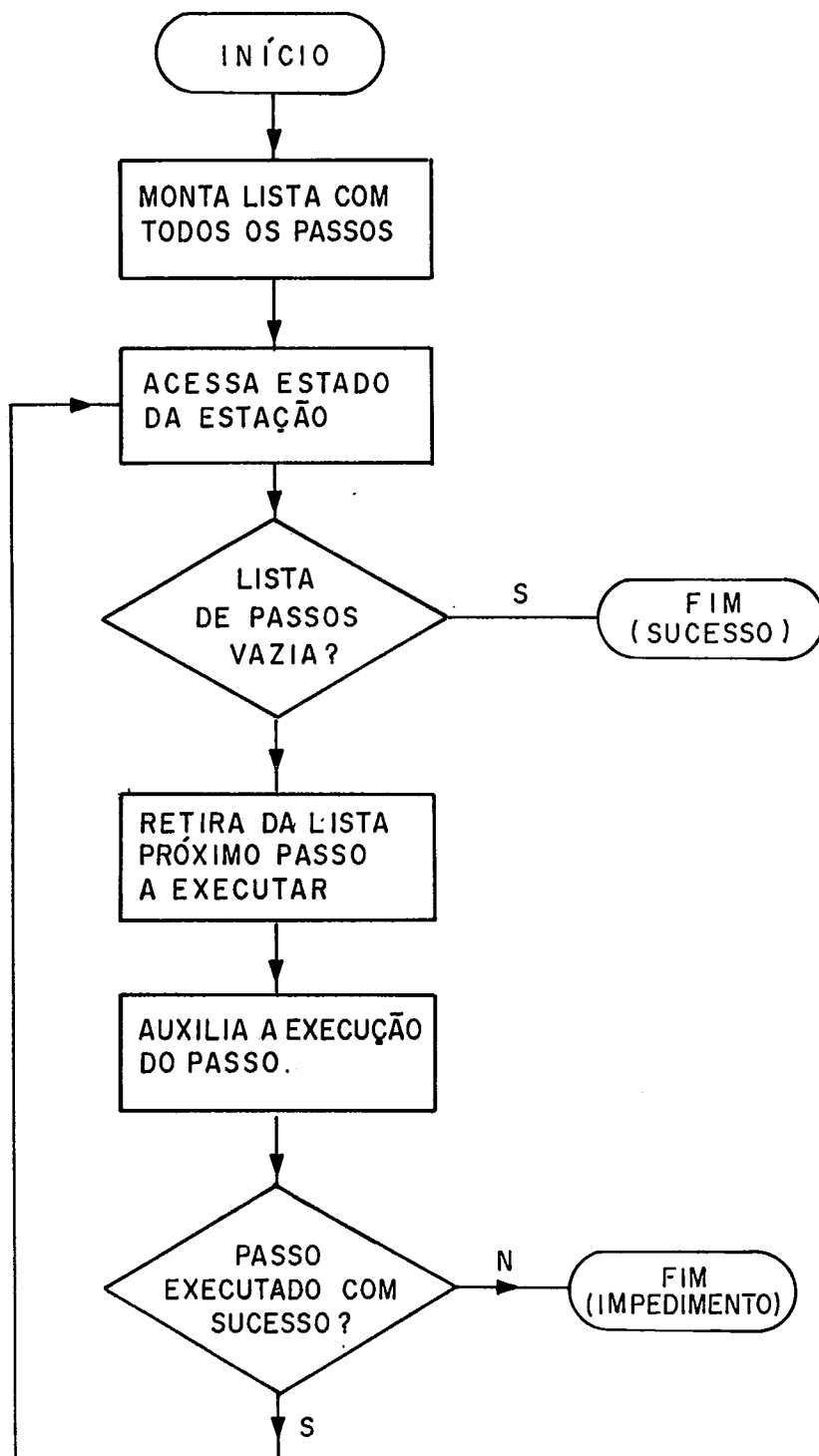


Fig.VI. 10 FLUXOGRAMA DO MECANISMO DE INFERÊNCIA DO AUXILIAR PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO - CONTROLE DA EXECUÇÃO DE PASSOS

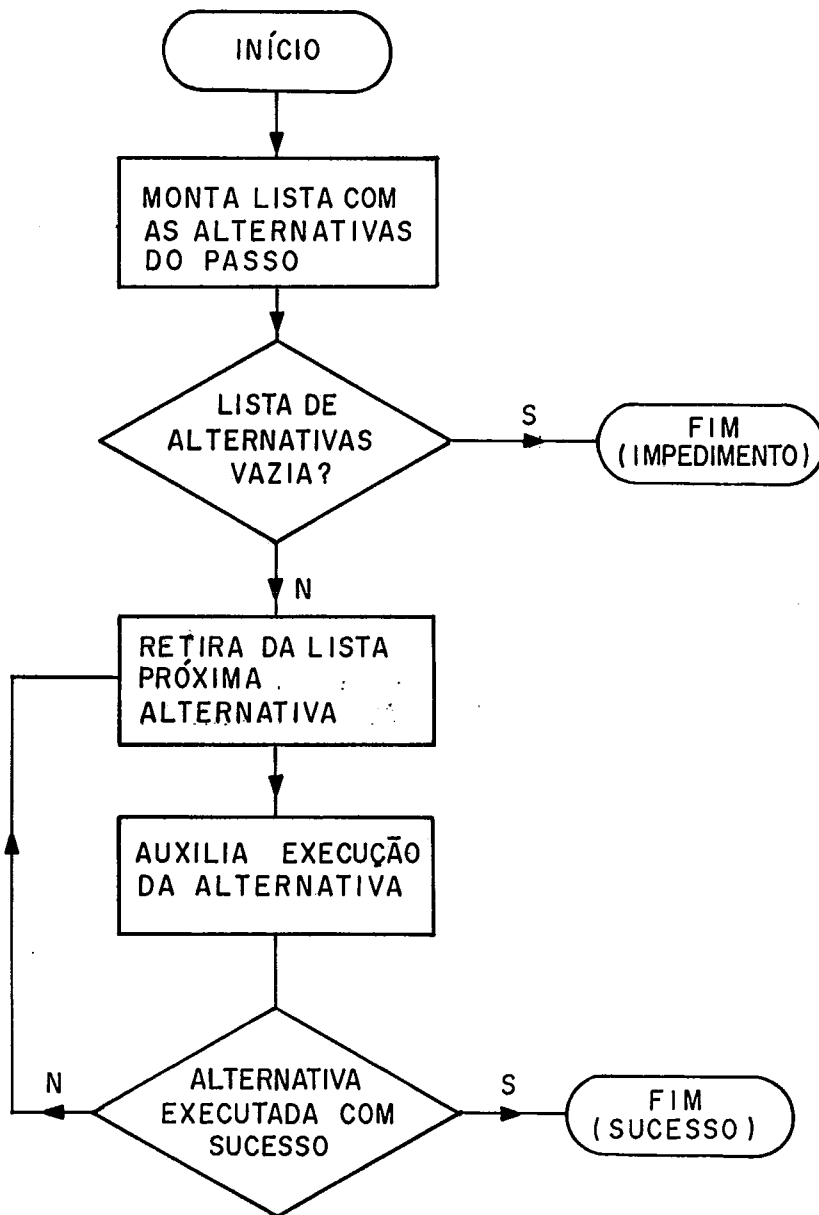


Fig.VI. 11 FLUXOGRAMA DO MECANISMO DE INFERÊNCIA DO AUXILIAR PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO - CONTROLE DA EXECUÇÃO DE ALTERNATIVAS

VII. Conclusão

Este trabalho analisou a utilização de sistemas baseados em conhecimento para a recomposição de sistemas elétricos de potência. Foi proposto um Sistema Distribuído Híbrido para Auxílio à Recomposição, utilizando uma arquitetura do tipo "blackboard". O sistema proposto se baseou em uma filosofia distribuída de recomposição, que está em implantação nas principais empresas brasileiras de energia elétrica. Finalmente foram implementados protótipos em TURBO-PROLOG para parte do proposta formulada.

As conclusões que se seguem foram obtidas do conjunto do trabalho.

Devido à natureza do problema da recomposição, e à adoção generalizada de filosofias distribuídas para a recomposição, uma aproximação que não seja distribuída não poderá tratar adequadamente todos os aspectos do problema, e só poderá fornecer soluções parciais.

A partir dessa constatação, um sistema do tipo do DPSK associado a uma arquitetura tipo "blackboard", tornam-se fundamentais para viabilizar uma rede de computadores de características heterogêneas, adequada para tratar o problema. Qualquer outra aproximação que não estabeleça uma interface padronizada, flexível e expansível entre os diversos resolvedores de problemas acomodados em computadores distintos e

possivelmente com diferentes sistemas operacionais, criaria uma estrutura rígida demais para ser expandida e bastante difícil de ser gerenciada.

O aspecto híbrido do problema é fundamental. No entanto, os algoritmos disponíveis atualmente não são satisfatórios, e a natureza combinatória do problema demanda técnicas de decomposição e processamento paralelo.

As instruções de operação para recomposição devem ser a fonte de conhecimento principal do sistema. No entanto, necessitam ser enriquecidas com cenários distintos que considerem a possível indisponibilidade de equipamentos.

A prototipação rápida e o teste "on-line" não podem evidentemente ser adotados por um sistema para a recomposição. Ao desenvolvimento de um protótipo devem estar associadas ferramentas para estabelecimento de cenários que possibilitem um extensivo procedimento de testes e de treinamento "off-line". O ideal seria a disponibilidade de um Simulador para Treinamento de Despachantes que pudesse estabelecer essa variedade de cenários.

Do desenvolvimento dos protótipos, outras conclusões podem ser obtidas.

A disposição do conhecimento em camadas, utilizada no desenvolvimento dos protótipos, é fundamental para permitir ao usuário a entrada do conhecimento necessário. Esta aproximação já havia sido proposta e utilizada com sucesso por Lima, L.C. [21c] na construção de um protótipo para um sistema

especialista inteligente. A camada externa de conhecimento corresponde ao conhecimento mais mutável, e é construída em cima de uma camada interna, que corresponde ao conhecimento mais estável. Enquanto a camada externa é atualizada pelo usuário, a camada interna necessita de um especialista na linguagem. No caso do protótipo do Auxiliar para Recomposição Fluente da Estação, a instrução de recomposição fluente da estação constitui um conhecimento passível de ser modificado, enquanto o conjunto de ações e condições tais como "enviar tensão", "esperar fluxo na linha", "fechar anel", etc., é claramente um conhecimento de base para a recomposição.

A modelagem obtida para o problema da recomposição fluente mostrou-se bastante satisfatória. A sua generalidade permite a aplicação em outros problemas.

A utilização do PROLOG como linguagem simbólica mostrou-se perfeitamente adequada ao problema. Características como recursividade, processamento de listas, e definição de objetos compostos foram fundamentais para a codificação de mecanismos de inferência bastante simples e concisos.

A proposta de solução híbrida foi essencial para a simplicidade dos protótipos. Uma vez que os Monitores de Estado propostos no capítulo V são os responsáveis pela obtenção da configuração e do estado, os protótipos não precisam incorporar conhecimento nem efetuar o processamento da topologia da estação. O estado do sistema e da estação é para os protótipos um conjunto de variáveis simbólicas que necessitam ser "casadas".

A complexidade do problema da recomposição ficou bastante clara na elaboração deste trabalho. Além de sistemas especialistas, foram abordadas áreas bastante diversas de sistemas e computação, tais como a programação matemática necessária para tratar o problema, o processamento paralelo e as técnicas de decomposição necessárias para viabilizar a implantação em tempo real desses modelos matemáticos, sistemas distribuídos para tratar a natureza distribuída da recomposição, arquiteturas flexíveis para acomodar diferentes processadores com características diversas, etc.

A investigação dos aspectos do problema da recomposição ligados a cada uma dessas áreas, pela sua interligação e complexidade, deveria ser parte de um amplo projeto integrado de pesquisa para viabilizar o desenvolvimento de um sistema para recomposição.

Essas áreas de pesquisa constituem atualmente áreas de ponta da pesquisa de soluções para o problema operativo global. Uma arquitetura mais aberta e distribuída é a expectativa para a nova geração de sistemas de Supervisão e Controle. A adoção de técnicas de programação matemática acopladas ao processamento paralelo também seria fundamental para a implementação dos controles em emergência e preventivo.

Do ponto de vista do desenvolvimento dos protótipos, embora o conhecimento codificado seja sem dúvida específico do problema da recomposição, as modelagens propostas podem ser consideradas bastante gerais. Assim, foram na realidade definidos modelos para um Monitor e para um Auxiliar baseados em conhecimentos.

A modelagem para o protótipo do Monitor da Recomposição Fluente do Sistema pode ser associada ao Monitor do Estado do Sistema para produzir um Monitor Inteligente do Estado do Sistema. Este Monitor "Inteligente" reconheceria padrões tanto quantitativos como qualitativos para determinar o estado do sistema. Poderiam ser reconhecidos padrões de sobretensão, de sobrecarga, etc., para estabelecer por exemplo que o sistema está em um estado de emergência moderada de tensão.

A modelagem proposta para o Auxiliar da Recomposição Fluente da Estação também poderia ser utilizada em outros procedimentos sequenciais, passo a passo, onde alternativas tivessem que ser consideradas através da verificação de condições e execução de ações.

Referências Bibliográficas

- [1] Dy Liacco, T.E. - "The Adaptive Reliability Control System" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, no. 5, may/1967, pp 517-531.
- [2] Dy Liacco, T.E. - " A Critique of Control Center Design and Its Effect on Power System Operation" - 4th Latin American Symposium on Power System Control Centers, Rio de Janeiro, Brasil, may/1984.
- [3] Talukdar, S.N., Wu, F.F. - "Computer-Aided Dispatch for Electric Power Systems" - Proceedings of the IEEE, vol. 69, no. 10, oct/1981, pp. 1212-1231.
- [4] Dy Liacco, T.E. - "An Overview of Practices and Trends in Power System Control Centers" - Proc. IFAC Congress, Helsinki, 1978, pp. 1499-1510.
- [5] Dy Liacco, T.E. - "System Control Center Design" - Proceedings, Engineering Foundation Conference on "Systems Engineering for Power: Status and Prospects", Henniker, N.H., aug/1975.
- [6] Russel, J.C., Masiello, R.D., Bose, A. - "Power Systems Control Center Concepts" - 1979 IEEE Power Industry Computer Applications Conference, pp. 170-175.
- [7] Dy Liacco, T.E. - "System Security : the computer's role" - IEEE Spectrum, vol. 15, jun/1978, pp. 43-50.

- [8] Dy Liacco, T.E. - "Real Time Computer Control of Power Systems" - Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 7, jul/1974, pp. 884-891.
- [9] Cegrell, T., Dahlfors, F. - "125 Computerized Power System Control Centers - An Experience Base for Future Concepts" - CIGRE, 1984 Session.
- [10] Monteiro, V.L.L. - "Desenvolvimento de um Protocolo de Comunicação entre Dois Sistemas Distribuídos" - tese de mestrado, COPPE-UFRJ, abr/1988.
- [11] Dy Liacco, T.E. - "Design and Performance Criteria For Power System Control Centers" - The Cleveland Electric Illuminating Company, Cleveland, Ohio, U.S.A.
- [12] Fink, L.H., Carlsen, K. - "Operating Under Stress and Strain" - IEEE Spectrum, mar/1978, pp. 48-53.
- [13] - 2a. Wu, F.F., Monticelli, A. - "Analytical Tools for Power System Restoration - Conceptual Design" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 1, feb/1988, pp 10-16.
- [14] Machado, P.A., Pereira, L.A.C., Lima, L.C., Oliveira, M.E.B.M., Pitta, R.L.A., Silveira, L.M.G. - "Conceitos para o Subsistema de Análise de Redes" - Relatório Técnico CEPTEL 140/87, abr/1987.
- [15] Teixeira, M.J., Morozowsky Fo., M., Lambert, N., Lima, L.C., Machado, P.A. - "Uma Nova Geração de Centros de Controle de Energia" - 8o. Congresso Brasileiro de Automática, Belém-PA, 10-14 set/1990.

[16] IEEE Committee Report - "Power System Restoration - A Task Force Report" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRS-2, no. 2, may/1987, pp. 271-277.

[17] Kafka, R.J., Penders, D.R., Bouchey, S.H., Adibi, S.M. - "System Restoration Plan Development for a Metropolitan Electric System" - IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, no. 8, aug/1981, pp. 3703-3713.

[18] Borges, R.C. - "Uma Nova Abordagem da Filosofia e dos Critérios para a Recomposição do Sistema Interligado Brasileiro (MINUTA)" - Grupo de Trabalho de Estudos de Operação do Subcomitê de Operação, do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), 1989.

[19] SCO/GTEO - "Análise da Filosofia e dos Critérios para Recomposição do Sistema Interligado Brasileiro" - Grupo de Trabalho de Estudos de Operação do Subcomitê de Operação, do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), SCO/GTEO 002/88.

[20] Gutierrez, J., Staropolsky, M., Garcia, A. - "Policies for Restoration of a Power System" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRS-2, no. 2, may/1987.

[21] Kafka, R.J., Penders, D.R., Bouchey, S.H., Adibi, S.M. - "Role of Interactive and Control Computers in the Development of a System Restoration Plan" - IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-101, no. 1, jan/1982, pp. 43-52.

[22] IEEE Committee Report - "Power System Restoration - The Second Task Force Report" - IEEE Trans. on Power Systems, vol.

PWRS-2, no. 2, nov/1987, pp. 927-933.

[23] SCO/GTAN - "Norma de Operação N.O. 0006 : Normalização após Perturbação" - Grupo de Trabalho de Análise e Elaboração de Normas de Operação, do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), SCO/GTAN 002/89.

[24] SCO/GTEO - "Filosofia e Critérios para Recomposição do Sistema Interligado Brasileiro" - Grupo de Trabalho de Estudos de Operação do Subcomitê de Operação, do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), SCO/GTEO 001/89.

[25] SCO/GTAN - "Instrução de Operação IO-83 : Recomposição das Areas São Paulo e Minas Gerais em Perturbação Geral" - Grupo de Trabalho de Análise e Elaboração de Normas de Operação, do Grupo Coordenador para Operação Interligada (GCOI), SCO/GTAN, jun/1990.

[26] Corlett, R.A. - "Artificial Intelligence Languages and Their Environments" - GEC Journal of Research, vol. 5, no. 1, 1987, pp. 21-30.

[27] Rich, E. - Artificial Intelligence - McGraw-Hill, 1983.

[28] Cardozo, Eleri - "Integração de Técnicas de Inteligência Artificial e Pesquisa Operacional" - Pesquisa Operacional, vol. 7, no. 1, jul/1987.

[29] Taylor, T., Lubkeman, D. - "Applications of Knowledge-Based Programming to Power Engineering Problems" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, no. 1, feb/1989, pp. 345-352.

[30] Sustaeta, J.G., Muth, M.M., Gallegos, A.A. - "Sistemas Expertos para Supervisión y Control de Procesos Industriales :

Ejemplo de Aplicación en una Planta Termoeléctrica" - BOLETIN IIE, jul/ago 1989, vol. 12, num. 4.

[31] Lavallo, M.M., Rodriguez, G. - "Análisis de Herramientas para Desarrollo de Sistemas Expertos" - BOLETIN IIE, mayo/junio 1989, vol. 13, num. 3.

[32] Cheng, S.J., Malik, O.P., Hope, G.S. - "An Expert System for Voltage and Reactive Power Control of a Power System" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 4, nov/1988, pp. 1449-1455.

[33] Electric Power Research Institute - "Artificial Intelligence Technologies for Power System Operations" - EPRI Report EL-4323, Project RP1999-7, Final Report, jan/1986.

[34] Townsend, C. - Introduction to Turbo-Prolog - Sybex, Berkeley, 1987.

[35] Hwa, L.K. - "Planejamento da Expansão a Longo Prazo de Redes de Transmissão de Energia Elétrica Usando Técnicas de Sistemas Baseados em Conhecimento" - tese de mestrado, COPPE-UFRJ, jul/1987.

[36] Lima, L.C. - "Sistemas Especialistas Aplicados ao Processamento de Alarmes em Centros de Controle" - tese de mestrado, COPPE-UFRJ, jan/1988.

[37] Schulte, R.P., Larsen, S.L., Sheble, G.B., Wrubel, J.N. - "Artificial Intelligence Solutions to Power System Operating Problems" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWR-2, no. 4, nov/1987, pp. 920-926.

[38] Talukdar, S.N., Cardozo, E., Perry, T. - "The Operator's

Assistant - An Intelligent, Expandable Program for Power System Trouble Analysis" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRs-1, no. 3, aug/1986.

[39] Pinho, A.A. - "Métodos Não Informados de Busca" - Relatório Técnico do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, no. ES-91/86, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, abr/1986.

[40] Pinho, A.A. - "Métodos Informados de Busca" - Relatório Técnico do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, no. ES-93/86, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, mai/1986.

[41] Pinho, A.A. - "Prova de Teoremas" - Relatório Técnico do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, no. ES-98/86, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, mai/1986.

[42] Harmon, P., King, D. - Sistemas Especialistas - Campus, 1988.

[43] CEPEL - "Perspectivas de Inteligência Artificial no CEPEL" - Minuta, 1990.

[44] Hein, F., Schellstede, G. - "Introduction of Expert Systems in Control Centres" - CIGRE, Study Committee 39 Meeting in Tokyo, Japan, oct/1987.

[45] Christie, R.D., Talukdar, S.N. - "Expert Systems for On Line Security Assessment - A Preliminary Design" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 2, may/1988, pp. 654-659.

[46] Liu, C.C., Tomsovic, K. - "An Expert System Assisting Decision-Making of Reactive Power/Voltage Control" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRs-1, no.3, aug/1986, pp. 195-201.

- [47] Wollenberg, B.F., Sakaguchi, T. - "Artificial Intelligence in Power System Operations" - Proceedings of the IEEE, vol. 75, no. 12, dec/1987, pp. 1678-1685.
- [48] Nasser, F.E.N., Silva, A.P.A., Araujo, L.A.P., Schwabe, D., Pereira, M.V.F., Monticelli, A. - "Development of an Expert System for Long-Term Planning of Power Transmission Networks" - Proceedings of the 2nd. Symposium of Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, U.S.A., jul/1989, pp. 238-243.
- [49] Fujiwara, R., Sakaguchi, T., Kohno, Y., Suzuki, H. - "An Intelligent Load-flow Engine for Power System Planning" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRs-1, no.3, aug/1986.
- [50] Zhang, Z.Z., Hope, G.S., Malik, O.P. - "Expert Systems in Electric Power Systems - A Bibliographical Survey" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, no. 4, nov/1989.
- [51] Nordgard, H., Gjerde, O., Holten, L., Meland, A., Dehli, E., Stoa, P. - "Knowledge Based Systems for Power System Operation" - CIGRE, 1988 Session.
- [52] Kirschen, D.S., Wollenberg, B.F., Irisarri, G.D., Bann, J.J., Miller, B.N. - "Controlling Power Systems During Emergencies: The Role of Expert Systems" - IEEE Computer Applications in Power, vol. 2, no. 2, apr/1989, pp. 41-45.
- [53] Hein, F., Schellstede, G. - "Use of Expert Systems in Energy Control Centers" - CIGRE, 1988 Session.
- [54] Wollenberg, B.F. - "Feasibility Study for an Energy Management System Intelligent Alarm Processor" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRs-1, no. 2, may/1986, pp. 241-247.

[55] Fukui, C., Kawakami, J. - "An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers" - IEEE Trans. on Power Delivery, vol. PWRD-1, no. 4, oct/1986, pp. 83-90.

[56] Sobajic, D.J., Pao, Y. - "An Artificial Intelligence System for Power System Contingency Screening" - IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, no. 2, may/1988, pp 647-653.

[57] Krost, G., Rumpel, D., N'Guessan, E. - " Design of a Network Restoration Expert System with Training Facilities" - Proceedings of the 2nd. Symposium of Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, U.S.A., jul/1989, pp. 392-398.

[58] Sakaguchi, T., Matsumoto, K. - "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration" - IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 2, feb/1983.

[59] Blessing, L.R., Bush, C.K., Yak, S.J. - " Automated Power System Restoration Incorporating Expert System Techniques" - Proceedings of the 2nd. Symposium of Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, U.S.A., jul/1989, pp. 133-139.

[60] Wang, S., Dong, Z., Sun, Q., Xia, D. - " An Expert System for Bulk Power System Restoration" - Proceedings of the 2nd. Symposium of Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, U.S.A., jul/1989, pp. 128-132.

[61] Darnault, P.H., Fandino, J., Bigeon, J., Sabonnadière, J.C., Mondon, E., Harmand, Y., Pierrat, L. - " An Expert System as a Guide for Information Synthesis and Decision Making in the Restoration of Power System After a Blackout" - Proceedings of

the 2nd. Symposium of Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, U.S.A., jul/1989, pp. 399-404.

[62] Cardozo, E. - " Expert Systems for Real Time Applications: Some Design and Implementation Issues" - Proceedings of the 2nd. Symposium of Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, U.S.A., jul/1989, pp. 469-473.

[63] Cardozo, E. - "DPSK User's Manual" - Engineering Design Research Center, Carnegie Mellon University, dec/1986.

[64] Moriguchi, S., Sakaguchi, H., Kunugi, M., Shimada, K., Suzuki, K. - "An Expert System for Power System Fault Analysis and Restoration" - CIGRE, Study Comittee Meeting in Tokyo, oct/1987.

[65] Talukdar, S.N., Cardozo, E., Podnar, G. - "Building Large Scale Software Organizations" - in Expert Systems for Engineering Design, M.D. Rychener (editor), Academic Press, 1988.

[66] Podnar, G., Cardozo, E. - "DPSK User's Guide for the IBM-AT/XT Personal Computers" - Divisão de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, may/1987.

[67] Cardozo, E., Talukdar, S.N. - "A Distributed Expert System for fault Diagnosis" - Proceedings of the IEEE Power Indsutry Computer Application Conference, Montreal, Canada, may/1987.

[68] Borland - TURBO-PROLOG 2.0 Reference Guide - Borland International, 1988.

[69] Borland - TURBO-PROLOG 2.0 User's Guide - Borland International, 1988.

[70] Cuadrado, C.Y., Cuadrado, J.L. - "Prolog Goes to Work" -
Byte, aug/1985.

APENDICE I - LISTAGEM DO ARQUIVO DE DEFINIÇÃO DO CONHECIMENTO
DO MONITOR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA

```
;
; Arquivo de Definicao de Conhecimento
; Monitoracao da  Recomposição Fluente
;
```

AREA -> Minas-SP 345 kv

SUBAREA -> USLC-UHJG-UHVG.

```
ALTERNATIVA -> LC-JG e LC-VG
estado -> UG(USLC,4)
estado -> LT(USLC,f,UHJG,f,_)
estado -> LT(USLC,f,UHVG,f,_)

```

SUBAREA -> USFU-SEPI.

```
ALTERNATIVA -> FU-PI
estado -> UG(USFU,4)
estado -> LT(USFU,f,SEPI,f,_)

```

SUBAREA -> USLC-USFU-STPC.

```
ALTERNATIVA -> LC-FU, FU-PC e LC-PC.
estado -> LT(USFU,f,USLC,f,_)
estado -> LT(USLC,f,STPC,f,_)
estado -> LT(USFU,f,STPC,f,_)

```

```
ALTERNATIVA -> indisponivel lt FU-LC.
estado -> LT(USLC,f,STPC,f,_)
estado -> LT(USFU,f,STPC,f,_)

```

```
ALTERNATIVA -> indisponiveis lts FU-PC.
estado -> LT(USFU,f,USLC,f,_)
estado -> LT(USLC,f,STPC,f,_)

```

```
ALTERNATIVA -> indisponiveis lts LC-PC.
estado -> LT(USFU,f,USLC,f,_)
estado -> LT(USFU,f,STPC,f,_)

```

SUBAREA -> STPC-STGA-ETNO-STCA.

ALTERNATIVA -> PC-GA, GA-NO, PC-CA, CA-GA.

estado -> LT(STPC,f,STGA,f,_)
 estado -> LT(STGA,f,STNO,f,_)
 estado -> LT(STPC,f,STCA,f,_)
 estado -> LT(STCA,f,STGA,f,_)
 estado -> CG(STPC,70)
 estado -> CG(STCA,120)
 estado -> CG(ETNO,100)

ALTERNATIVA -> indisponiveis lts PC-GA".

estado -> LT(STGA,f,STNO,f,_)
 estado -> LT(STPC,f,STCA,f,_)
 estado -> LT(STCA,f,STGA,f,_)
 estado -> CG(STPC,70)
 estado -> CG(STCA,120)
 estado -> CG(ETNO,100)

SUBAREA -> USLC-USFU-STPC-2os. circs.

ALTERNATIVA -> 2 circs. FU-PC e LC-PC.

estado -> LT(USFU,f,STPC,f,1)
 estado -> LT(USFU,f,STPC,f,2)
 estado -> LT(USLC,f,STPC,f,1)
 estado -> LT(USLC,f,STPC,f,2)

ALTERNATIVA -> indisponiveis lts FU-PC.

estado -> LT(USLC,f,STPC,f,1)
 estado -> LT(USLC,f,STPC,f,2)

ALTERNATIVA -> indisponiveis lts LC-PC.

estado -> LT(USFU,f,STPC,f,1)
 estado -> LT(USFU,f,STPC,f,2)

SUBAREA -> STPC-STGA-ETNE.

ALTERNATIVA -> PC-GA 1e2, GA-NE.

estado -> LT(STPC,f,STGA,f,1)
 estado -> LT(STPC,f,STGA,f,2)
 estado -> LT(STGA,f,ETNE,f,_)
 estado -> CG(ETNE,100)

APENDICE II - LISTAGEM DA BASE DE CONHECIMENTOS DO
MONITOR DA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DO SISTEMA

```

/*-----*/
/* Base de Conhecimentos do Monitor da Recomposicao Fluente */
/*-----*/
clauses

/* area(nome_da_area) */

area("Minas-SP 345 kv").

/* subarea(nome_da_area,nome_da_sub_area) */

subarea("Minas-SP 345 kv","USLC-UHJG-UHVG").
subarea("Minas-SP 345 kv","USFU-SEPI").
subarea("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC").
subarea("Minas-SP 345 kv","STPC-STGA-ETNO-STCA").
subarea("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC-2os. circs.").
subarea("Minas-SP 345 kv","STPC-STGA-ETNE").

/* alternativa(nome_da_area,nome_da_subarea, */
/* nome_da_alternativa) */

alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-UHJG-UHVG",
"configuracao completa").

alternativa("Minas-SP 345 kv","USFU-SEPI",
"configuracao completa").

alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
"LC-FU, FU-PC e LC-PC").
alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
"indisponivel lt FU-LC").
alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
"indisponiveis lts FU-PC").
alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
"indisponiveis lts PC-LC").

alternativa("Minas-SP 345 kv","STPC-STGA-ETNO-STCA",
"PC-GA, GA-NO, PC-CA, e CA-GA").
alternativa("Minas-SP 345 kv","STPC-STGA-ETNO-STCA",
"indisponiveis lts PC-GA").

```

```

alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC-2os. circs.",
            "pelo menos 3 lts para STPC").
alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC-2os. circs.",
            "indisponiveis lts FU-PC").
alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC-2os. circs.",
            "indisponiveis lts LC-PC").

alternativa("Minas-SP 345 kv","STPC-STGA-ETNE",
            "PC-GA 1e2, GA-NE").

```

```

/* verifica_alternativa(nome_da_area,nome_da_sub_area,      */
/*                       nome_da_alternativa)                */
/*                                                           */
/* estado(eqpto),                                           */
/* onde eqpto = lt(est_de,est_para,ncir,st_de,st_para)    */
/*               ug(estacao,num_unid_sincro)                */
/*               cg(estacao,mw_max_tomada_carga)            */
/*                                                           */

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-UHJG-UHVG",
                    "configuracao completa") :-
    estado(ug("USLC",4)),
    estado(lt("USLC","UHJG",_,f,f)),
    estado(lt("USLC","UHVG",_,f,f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv","USFU-SEPI",
                    "configuracao completa") :-
    estado(ug("USFU",4)),
    estado(lt("USFU","SEPI",_,f,f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
                    "LC-FU, FU-PC e LC-PC") :-
    estado(lt("USLC","USFU",_,f,f)),
    estado(lt("USLC","STPC",_,f,f)),
    estado(lt("USFU","STPC",_,f,f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
                    "indisponivel lt FU-LC") :-
    estado(lt("USLC","STPC",_,f,f)),
    estado(lt("USFU","STPC",_,f,f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
                    "indisponiveis lts FU-PC") :-
    estado(lt("USLC","USFU",_,f,f)),
    estado(lt("USLC","STPC",_,f,f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv","USLC-USFU-STPC",
                    "indisponiveis lts PC-LC") :-
    estado(lt("USLC","USFU",_,f,f)),
    estado(lt("USFU","STPC",_,f,f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv", "STPC-STGA-ETNO-STCA",
    "PC-GA, GA-NO, PC-CA, e CA-GA") :-
    estado(lt("STPC", "STGA", _, f, f)),
    estado(lt("STGA", "ETNO", _, f, f)),
    estado(lt("STPC", "STCA", _, f, f)),
    estado(lt("STCA", "STGA", _, f, f)),
    estado(cg("STPC", 70)),
    estado(cg("STCA", 120)),
    estado(cg("ETNO", 100)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv", "STPC-STGA-ETNO-STCA",
    "indisponiveis lts PC-GA") :-
    estado(lt("STGA", "ETNO", _, f, f)),
    estado(lt("STPC", "STCA", _, f, f)),
    estado(lt("STCA", "STGA", _, f, f)),
    estado(cg("STPC", 70)),
    estado(cg("STCA", 120)),
    estado(cg("ETNO", 100)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv",
    "USLC-USFU-STPC-2os. circos.",
    "pelo menos 3 lts para STPC") :-
    estado(lt("USFU", "STPC", 1, f, f)),
    estado(lt("USFU", "STPC", 2, f, f)),
    estado(lt("USLC", "STPC", 1, f, f)),
    estado(lt("USLC", "STPC", 2, f, f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv",
    "USLC-USFU-STPC-2os. circos.",
    "indisponiveis lts FU-PC") :-
    estado(lt("USLC", "STPC", 1, f, f)),
    estado(lt("USLC", "STPC", 2, f, f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv",
    "USLC-USFU-STPC-2os. circos.",
    "indisponiveis lts LC-PC") :-
    estado(lt("USFU", "STPC", 1, f, f)),
    estado(lt("USFU", "STPC", 2, f, f)).

```

```

verifica_alternativa("Minas-SP 345 kv",
    "STPC-STGA-ETNE", "PC-GA 1e2, GA-NE") :-
    estado(lt("STPC", "STGA", 1, f, f)),
    estado(lt("STPC", "STGA", 2, f, f)),
    estado(lt("STGA", "ETNE", _, f, f)),
    estado(cg("ETNE", 100)).

```

APENDICE III - LISTAGEM DO ARQUIVO DE ESTADO DO SISTEMA

```
estado(ug("USLC",4)).
estado(lt("USLC","UHJG",1,"f","f")).
estado(lt("USLC","UHVG",1,"f","f")).
estado(lt("STPC","STGA",1,"f","f")).
estado(lt("STPC","STGA",2,"f","f")).
estado(lt("USLC","USFU",1,"a","a")).
estado(lt("STGA","ETNE",1,"f","f")).
estado(cg("ETNE",90)).
estado(lt("STPC","STGA",1,"f","f")).
estado(cg("STCA",120)).
estado(LT("USFU","STPC",1,"f","f")).
estado(LT("USFU","STPC",2,"f","f")).
estado(lt("USLC","STPC",1,"a","a")).
estado(lt("USLC","STPC",2,"a","a")).
```

APENDICE IV - LISTAGEM DO ARQUIVO DE DEFINIÇÃO DO CONHECIMENTO
DO AUXILIAR PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO

```
;
; Arquivo de definicao do conhecimento
; Auxiliar para Recomposicao Fluente
;
```

ESTACAO -> STPC

PASSO -> recebe tensao de USLC e/ou USFU

```
ALTERNATIVA -> tensao de USLC e USFU
acao-> recebe_tensao(USLC,LC-PC,1o.)
acao-> fecha_anel(USLC e USFU,USFU,FU-PC,1o.)
```

```
ALTERNATIVA -> tensao somente de USLC
condicao-> falha_em_linha(USFU,FU-PC,1o.)
acao-> recebe_tensao(USLC,LC-PC,1o.)
```

```
ALTERNATIVA -> tensao somente de USFU
condicao->falha_em_linha(USLC,FU-LC,1o.)
acao-> recebe_tensao(USFU,FU-PC,1o.)
```

PASSO -> envia tensao para STGA e STCA e restabelece carga

```
ALTERNATIVA -> STGA com fluxo, carga e STCA
acao-> envia_tensao(STGA,GA-PC,1o.)
condicao-> fluxo_em_linha(STGA,GA-PC,1o.,0.0) .
acao-> restabelece_carga(PC-CEMIG,70)
acao-> envia_tensao(STCA,CA-PC,1o.)
```

```
ALTERNATIVA -> STGA impedida, STCA com fluxo e carga
acao-> envia_tensao(STGA,GA-PC,1o.)
condicao-> falha_em_linha(STGA,GA-PC,1o.)
acao-> envia_tensao(STCA,CA-PC,1o.)
acao-> restabelece_carga(PC-CEMIG,70)
```

PASSO -> recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs

```
ALTERNATIVA -> tensao de USLC e USFU
acao-> recebe_tensao(USFU,FU-PC,2o.)
acao-> recebe_tensao(USLC,FU-LC,2o.)
```

ALTERNATIVA -> tensao somente de USLC
condicao-> falha_em_linha(USFU,FU-PC,1o.)
condicao-> falha_em_linha(USFU,FU-PC,2o.)
acao-> recebe_tensao(USLC,FU-LC,2o.)

ALTERNATIVA -> tensao somente de USFU
condicao-> falha_em_linha(USLC,LC-PC,1o.)
condicao-> falha_em_linha(USLC,LC-PC,2o.)
acao-> recebe_tensao(USFU,FU-PC,2o.)

PASSO -> envia tensao para STGA, 2o. circ.

ALTERNATIVA -> unica
acao-> envia_tensao(STGA,PC-GA,2o.)

APENDICE V - LISTAGEM DA BASE DE CONHECIMENTOS PARA O
AUXILIAR PARA RECOMPOSIÇÃO FLUENTE DA ESTAÇÃO

```
/*-----*/
/* Base de Conhecimentos do Auxiliar p/ Recomposicao Fluente */
/*-----*/
clauses
```

```
/* */
/* estacao(nome_da_estacao) */
/* */
    estacao("STPC").
```

```
/* */
/* passo(nome_da_estacao,nome_do_passo) */
/* */
```

```
passo("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU").
passo("STPC",
    "envia tensao para STGA e STCA e restabelece carga").
passo("STPC",
    "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.").
passo("STPC","envia tensao para STGA, 2o. circs").
```

```
/* */
/* alternativa(nome_da_estacao,nome_do_passo, */
/*             nome_da_alternativa) */
/* */
```

```
alternativa("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU",
    "tensao de USLC e USFU ").
alternativa("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU",
    "tensao somente de USLC").
alternativa("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU",
    "tensao somente de USFU").
```

```
alternativa("STPC",
    "envia tensao para STGA e STCA e restabelece carga",
    "STGA com fluxo, carga e STCA").
alternativa("STPC",
    "envia tensao para STGA e STCA e restabelece carga",
    "STGA impedida, STCA com fluxo e carga").
```

```

alternativa("STPC",
  "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.",
  "tensao de USLC e USFU ").
alternativa("STPC",
  "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.",
  "tensao somente de USLC").
alternativa("STPC",
  "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.",
  "tensao somente de USFU").

```

```

alternativa("STPC",
  "envia tensao para STGA, 2o. circ.", "unica").

```

```

/*                                                    */
/*                                                    */
/*  executa_alternativa(nome_da_estacao, nome_do_passo,  */
/*                        nome_da_alternativa)          */
/*                                                    */
/*                                                    */

```

```

executa_alternativa("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU",
  "tensao de USLC e USFU ") :-
  acao(recebe_tensao("USLC","LC-PC","1o.")),
  acao(fecha_anel("USLC e USFU","USFU","FU-PC","1o.")).

```

```

executa_alternativa("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU",
  "tensao somente de USLC") :-
  condicao(falha_em_linha("USFU","FU-PC","1o.")),
  acao(recebe_tensao("USLC","LC-PC","1o.")).

```

```

executa_alternativa("STPC","recebe tensao de USLC e/ou USFU",
  "tensao somente de USFU") :-
  condicao(falha_em_linha("USLC","FU-LC","1o.")),
  acao(recebe_tensao("USFU","FU-PC","1o.")).

```

```

executa_alternativa("STPC",
  "envia tensao para STGA e STCA e restabelece carga",
  "STGA com fluxo, carga e STCA):-
  acao(envia_tensao("STGA","GA-PC","1o.")),
  condicao(fluxo_em_linha("STGA","GA-PC","1o.",0)),
  acao(restabelece_carga("PC-CEMIG",70)),
  acao(envia_tensao("STCA","CA-PC","1o.")).

```

```

executa_alternativa("STPC",
  "envia tensao para STGA e STCA e restabelece carga",
  "STGA impedida, STCA com fluxo e carga):-
  acao(envia_tensao("STGA","GA-PC","1o."));
  condicao(falha_em_linha("STGA","GA-PC","1o.")),
  acao(envia_tensao("STCA","CA-PC","1o.")),
  acao(restabelece_carga("PC-CEMIG",70)).

```

```

executa_alternativa("STPC",
    "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.",
    "tensao de USLC e USFU "):-
    acao(recebe_tensao("USFU","FU-PC","2o.")),
    acao(recebe_tensao("USLC","FU-LC","2o.")).

executa_alternativa("STPC",
    "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.",
    "tensao somente de USLC):-
    condicao(falha_em_linha("USFU","FU-PC","1o.")),
    condicao(falha_em_linha("USFU","FU-PC","2o.")),
    acao(recebe_tensao("USLC","FU-LC","2o.")).

executa_alternativa("STPC",
    "recebe tensao de USLC e/ou USFU, 2os. circs.",
    "tensao somente de USFU" ):-
    condicao(falha_em_linha("USLC","LC-PC","1o.")),
    condicao(falha_em_linha("USLC","LC-PC","2o.")),
    acao(recebe_tensao("USFU","FU-PC","2o.")).

executa_alternativa("STPC",
    "envia tensao para STGA, 2o. circ.", "unica" ):-
    acao(envia_tensao("STGA","PC-GA","2o.")).

```

APENDICE VI - CONJUNTO DE PRIMITIVAS CONSTRUIDAS PARA STPC

condicao(fluxo_em_linha(Est,Lt,Cir,Val))

Espera fluxo de Val mw na linha Lt, Circuito Cir,
para a estação Est.

condicao(falha_em_linha(Est_oposta,Id,"1o."))

Verifica falha na linha Lt, Circuito Cir,
para a estacao Est.

acao(recebe_tensao(Est,Lt,Cir))

Recebe tensão da estação Est, pela linha Lt,
circuito Cir.

acao(envia_tensao(Est,Lt,Cir))

Envia tensão para a estação Est, pela linha Lt,
circuito Cir

acao(restabelece_carga(Est,Val))

Restabelece carga da estação Est, até Val mw.

APENDICE VII - DESCRIÇÃO DAS REGRAS CONDIÇÃO E AÇÃO
DO CONJUNTO DE PRIMITIVAS

Levando em consideração as ações e condições que ocorrem na recomposição fluente de STPC, a definição dos predicados "acao" e "condicao" é dada pelo trecho abaixo da biblioteca de primitivas:

domains

```
est, lt, cir = string
mw = integer

tipo_de_condicao = falha_em_linha(est,lt,cir);
                 fluxo_em_linha(est,lt,cir,mw)

tipo_de_acao    = recebe_tensao(est,lt,cir);
                 fecha_anel(anel,est,lt,cir);
                 restabelece_carga(est,mw);
                 envia_tensao(est,lt,cir)
.....
.....
```

predicates

```
acao(tipo_de_acao)
condicao(tipo_de_condicao)
```

As regras "condicao" e "acao" acionam fatos "estado", aplicados ao objeto composto "eqpto". O trecho abaixo do Mecanismo de Inferência define o predicado "estado" :

domains

```
est, lt, cir = string
kv, mw = real    /* tensao e fluxo ativo na linha */
status = symbol /* a= lt aberta, f= lt fechada */
imp     = symbol /* imp= lt impedida, ok= lt normal */

eqpto = lt(est,lt,cir,imp,status,kv,mw);
        cg(est,imp,status,mw)
.....
.....
```

database

```
estado(eqpto)
.....
.....
```

APENDICE VIII - LISTAGEM DO ARQUIVO DE ESTADO DA ESTAÇÃO

```
estado(lt("USLC", "LC-PC", 1, ok, a, 344.0, 0.0)).  
estado(lt("USFU", "FU-PC", 1, ok, a, 341.0, 0.0)).  
estado(lt("USFU", "FU-PC", 2, ok, a, 341.0, 0.0)).  
estado(lt("STGA", "GA-PC", 1, imp, a, 0.0, 0.0)).  
estado(cg("STPC", 0.0)).
```