

**ALCEU SARTOR FILHO**

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À  
RECOMPOSIÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE  
TRANSMISSÃO NA FASE FLUENTE**

**Florianópolis  
2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À  
RECOMPOSIÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE  
TRANSMISSÃO NA FASE FLUENTE**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

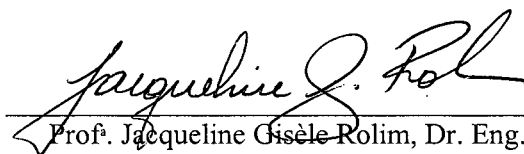
**ALCEU SARTOR FILHO**

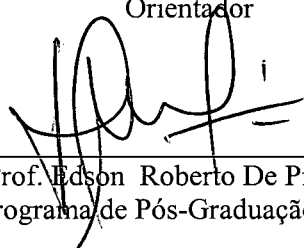
FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2002.

# SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À RECOMPOSIÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE TRANSMISSÃO NA FASE FLUENTE

Alceu Sartor Filho

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Potência*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

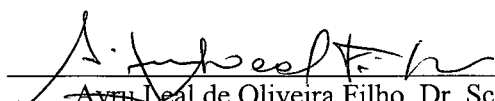
  
Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr. Eng.  
Orientador

  
Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

  
Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr. Eng.  
Presidente

  
Prof. Hans Helmut Zürn, Ph. D.

  
Ayru Leal de Oliveira Filho, Dr. Sc.

  
Prof. Guilherme Bittencourt, Dr.

## DEDICATÓRIA

*À minha querida esposa Elizete,  
pelo amor, por alimentar os sonhos  
e por acreditar que é possível.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela luz, força e amparo.

À Prof<sup>a</sup>. Jacqueline Gisèle Rolim pela orientação e confiança depositada.

Aos professores, colegas do Mestrado Profissional e do LABSPOT pelo ambiente amigo e de colaboração que me proporcionaram nestes anos.

Aos colegas da ELETROSUL que colaboraram com o seu conhecimento e incentivo.

Ao Márcio Segalin de Andrade pela valiosa colaboração na edição das regras e ao Paulo Roberto Medeiros pelo suporte na elaboração da interface gráfica.

À minha amiga Stella Maris da Veiga Pereira pelas sugestões e correções.

À Ana Gabriela da Silva e à Sílvia Sawada Simões Costa pela colaboração e ajuda prestada.

Aos amigos, sempre presentes, com suas palavras de incentivo me impulsionaram para seguir adiante.

À minha família e minha esposa pelo amor e sentimentos demonstrados.

À ELETROBRÁS/PRODESPO e à ELETROSUL pela indicação para participar deste mestrado profissional.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À RECOMPOSIÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE TRANSMISSÃO NA FASE FLUENTE**

**Alceu Sartor Filho**

Julho/2002

Orientador: Jacqueline Gisèle Rolim.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Palavras-chave: Recomposição de Sistemas de Transmissão, Recomposição Fluente, Sistemas Especialistas.

Número de Páginas: 116

## **RESUMO:**

Neste trabalho de mestrado são apresentadas as diversas etapas do desenvolvimento de um Sistema Especialista Baseado em Regras, proposto para auxiliar os operadores de subestações de sistemas de transmissão de energia elétrica na tarefa de recompor o sistema após contingências com desligamentos definitivos. As características do problema da recomposição de sistemas de potência (aspecto combinatorial, solução em vários estágios, diversos critérios a serem atendidos) dificultam a obtenção de soluções satisfatórias através de métodos analíticos. O Sistema Especialista desenvolvido visa dar apoio na etapa fluente da recomposição, quando os operadores realizam uma seqüência de manobras específicas para cada situação, a partir de instruções de operação preparadas através de estudos prévios, sem necessidade de troca de informações com o centro de operação do sistema. O conhecimento armazenado na base de regras do sistema especialista foi adquirido a partir dos manuais de operação e de especialistas na área. O sistema possui integração com um Sistema de Supervisão e Controle, permitindo a obtenção direta de informações da rede elétrica, sem a entrada de dados pelo operador. Apesar do grande número de regras colocadas na base de conhecimento, o uso de uma estrutura modular facilita a etapa de verificação e validação da ferramenta, assim como futuras manutenções. Os benefícios diretos que podem ser obtidos com o uso deste sistema são a diminuição da duração das interrupções de fornecimento e da probabilidade de erros humanos durante a recomposição.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **AN EXPERT SYSTEM FOR ASSISTING SUBSTATION OPERATORS DURING THE FLUENT PHASE OF TRANSMISSION SYSTEM RESTORATION**

**Alceu Sartor Filho**

July /2002

Advisor: Jacqueline Gisèle Rolim.

Area of Concentration: Electric Energy System.

Keywords: Transmission System Restoration, Fluent Restoration, Expert Systems

Number of Pages: 116

**ABSTRACT:** This work describes the development phases of a rule-based expert system, purposed to support the substation operators during the restoration of electric energy transmission networks, after contingencies with permanent outages. The characteristics of the power system restoration problem (combinatorial aspect, multi stages solution, several criteria to satisfy) make it difficult to apply analytical methods. The developed expert system aims to support the fluent phase of transmission systems restoration, when the operators perform a sequence of commands, following operational instructions previously prepared considering several studies, and without the need of exchanging information with the system operation center. The knowledge included in the knowledge base was obtained from the operation manuals and from specialists in this domain. The expert system is integrated with the supervisory system, thus the first can obtain the necessary data straight from the second, without the operator intervention. In spite of the large number of rules included in the knowledge base, its modular structure facilitates the verification and validation phase, besides future maintenance. The main benefits that may be obtained by the use of this support tool are the reduction of the duration of energy supply interruptions and the probability of human error during restoration process.

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações Iniciais .....	1
1.2. Empresas de Transmissão na Nova Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro .....	4
1.3 Objetivos deste Trabalho .....	8
1.4 Organização deste Trabalho .....	8
<b>2. Recomposição de Sistemas de Potência .....</b>	<b>10</b>
2.1 Introdução .....	10
2.2 Uma Introdução à Operação de Sistemas de Potência .....	11
2.3 Os Estados Operativos do Sistema .....	13
2.4 O Estado Restaurativo .....	16
2.5 A Operação do Sistema no Novo Cenário do Setor Elétrico Brasileiro .....	16
2.6 A Recomposição de Sistemas de Potência no Brasil .....	20
2.6.1 Considerações Iniciais sobre a Recomposição de Sistemas de Potência no Brasil .....	20
2.6.2 A Fase Fluente de Recomposição .....	22
2.7 Problemas, Mecanismos de Solução e Controles usados para a Recomposição de Sistemas de Transmissão .....	25
2.7.1 Considerações Iniciais sobre Problemas, Mecanismos de Solução e Controles Usados para a Recomposição de Sistemas de Transmissão.....	25
2.7.2 Usinas de Auto-Restabelecimento .....	26
2.7.3 Sobrecargas no Sistema .....	27
2.7.4 Sobretensões em Linhas e Transformadores .....	27
2.7.5 Incerteza de Carga após o blecaute .....	29
2.7.6 O Controle de Frequência na Fase Inicial da Recomposição .....	29
2.7.7 Manobras de Equipamentos .....	30
2.7.8 Fatores Associados à Operação de Sistemas de Transmissão .....	30
2.8 Conclusões .....	32
<b>3. Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas à Recomposição de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica .....</b>	<b>34</b>
3.1 Introdução .....	34
3.2 Considerações Iniciais sobre Inteligência Artificial .....	35
3.3 Aplicações de Inteligência Artificial na Área de Recomposição de Sistemas de Potência .....	37
3.4 Revisão Bibliográfica sobre o uso de Sistemas Especialistas na Recomposição de Sistemas de Transmissão .....	41
3.4.1 Categoria Conceitual de Aplicação de Sistemas Especialistas .....	42
3.4.2 Categoria da Utilização de Sistemas Especialistas na Operação em Tempo Real .....	45
3.4.3. Categoria de Considerações a respeito das Características dos Sistemas Especialistas .....	47
3.4.4 Categoria de Alternativas de Uso de SE para Sistemas Específicos .....	49
3.5 Paralelo entre Características Intrínsecas dos SEs e as da Operação de Sistemas de Transmissão Durante uma Recomposição .....	52
3.6 Conclusões .....	56



<b>4. Desenvolvimento do Sistema Especialista para Auxílio à Recomposição da Transmissão .....</b>	<b>59</b>
4.1 Introdução .....	59
4.2 A Escolha do Shell .....	60
4.2.1 Características Básicas do JESS .....	61
4.3 A Arquitetura do Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão – SART .....	65
4.4 O Desenvolvimento do Sistema Especialista .....	68
4.4.1 A Aquisição do Conhecimento .....	68
4.4.2 A Representação do Conhecimento .....	70
4.4.3 O Motor de Inferência .....	73
4.4.4 Testes em um Sistema Especialista .....	74
4.5 A Abordagem para a Subestação Areia .....	75
4.5.1 Características da Subestação Areia .....	76
4.5.2 Características do Sistema Especialista Implementado .....	76
4.5.3 Testes Realizados .....	76
4.5.4 Exemplo de um Caso de Recomposição .....	79
4.6 Conclusões .....	84
<b>5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>86</b>
Anexo 1- Mapa Geométrico da Subestação de Areia .....	91
Anexo 2- Diagrama Unifilar da Subestação de Areia .....	92
Anexo 3- Instruções Operacionais para Desligamento Geral e Circ. GBM1 e GBM2 .....	93
Anexo 4- Exemplo de Arquivo de Simulação do SAGE .....	100
Anexo 5- Exemplos de Regras .....	101
Referências .....	109

## Lista de Siglas

Sigla	Descrição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCPE	Comitê Coordenador do Planejamento do Sistema
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CNOS	Centro Nacional de Operação do Sistema
COSR	Centros Regionais de Operação do Sistema
CTEEP	Companhia Transmissora de Energia Elétrica de São Paulo
DIPC	Duração da Interrupção do Serviço da Rede Básica no Ponto de Controle
DMIPC	Duração Máxima da Interrupção do Serviço da Rede Básica no Ponto de Controle
ELETROSUL	Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil S.A.
EMS	Energy Management System
EPRI	Electric Power Research Institute
FIPC	Frequência da Interrupção do Serviço da Rede Básica no Ponto de Controle
GCOI	Grupo Coordenador para Operação do Sistema Interligado
IA	Inteligência Artificial
IED	Intelligent Electronic Device
IEEE	Institute of Electric and Electronics Engineers
IOs	Instruções Operacionais
JESS	Java Expert System Shell
LHS	Termo da língua inglesa <i>Left Hand Side</i> usado para designar o lado esquerdo da regra
MAE	Mercado Atacadista de Energia
MPO	Manual de Procedimentos da Operação
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OTS	Operating Training System
PSR-WG	Power System Restoration Working Group
RHS	Termo da língua inglesa <i>Right Hand Side</i> usado para designar o lado direito da regra
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
SART	Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SE	Sistema Especialista
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SSC	Sistema de Supervisão e Controle
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
UTR	Unidade Terminal Remota
V&V	Testes de validação e verificação
WEB	Termo da língua inglesa que representa o conceito de rede de computadores

# 1. Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

As mudanças ocorridas no Setor Elétrico Brasileiro (SEB) redefiniram o papel de várias empresas concessionárias de energia elétrica, entre elas, a Centrais Elétricas do Sul do Brasil (ELETROSUL), que era responsável pela geração, transmissão e operação do sistema elétrico na sua área de atuação, ou seja, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e Mato Grosso do Sul. Hoje a ELETROSUL (Empresa Transmissora de Energia Elétrica do Sul do Brasil S.A.) é responsável exclusivamente pela transmissão.

As receitas das empresas de transmissão são definidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), agente regulador do SEB. A maximização desta receita, depende da continuidade do serviço de transmissão. Para medir o desempenho das empresas de transmissão a ANEEL definiu indicadores de avaliação baseados no tempo e na frequência de indisponibilidade da rede de transmissão. Assim, quando ocorrer uma interrupção imprevista, quanto mais rápida e eficiente for a recuperação do serviço de transmissão, melhor será o índice do padrão de desempenho medido pela ANEEL.

Complexos dispositivos e sistemas de proteção são projetados e instalados nos sistemas de transmissão com a finalidade de, em situações de falta, isolar uma área e/ou proteger um equipamento, e como consequência, pode ocorrer o desligamento de cargas do sistema. Porém, alguns distúrbios podem levar o sistema elétrico a uma situação crítica em que desligamentos em cascata provocam uma degradação da frequência e/ou tensão. Como o sistema de transmissão é interligado, a perturbação pode se espalhar muito rapidamente por todo o sistema, atingindo um grande número de consumidores.

O sistema de transmissão é monitorado nos centros de operação que supervisionam e operam o sistema em tempo real. Uma das tarefas mais importantes e exigentes para a operação em tempo real, de um sistema de transmissão de energia elétrica é recompor o sistema após um distúrbio de grandes proporções, ou seja, um blecaute.

Todo sistema de energia elétrica está sujeito a um blecaute, para citar alguns:

a) Nos Estados Unidos aconteceram diversos blecautes. Em 1965 ocorreu um que afetou mais de 30 milhões de consumidores ocorrido pelo desligamento de uma linha de 230kV que deixou Nova Iorque por 13 horas sem energia elétrica. O de 1977 atingiu cerca de 9 milhões de consumidores, porém, o sistema levou cerca de 25 horas para ser completamente restaurado ( LEFÉVRE e SILVEIRA, 1997). E mais recentemente , em 14/06/2000, no Estado da Califórnia, os desligamentos atingiram 97.000 consumidores, e nos dias 17 e 18/01/2001 as regiões norte e central do Estado da Califórnia foram atingidas afetando milhares de consumidores, daquele estado americano.

b) No Brasil, um blecaute em 1984, afetou seis estados, em torno de 45 milhões de consumidores, e foi provocado pelo desligamento de dois transformadores que estavam em sobrecarga com a abertura da interligação Sul e Sudeste. No 11 de março de 1999 ocorreu outro que atingiu cerca de 70 milhões de consumidores, este teve como causa provável uma descarga elétrica em uma subestação; o desligamento atingiu as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Segundo GOMES et al. (2002), a carga cortada deste blecaute foi de 24.900 MW.

c) No desligamento ocorrido em 5/12/2001 na subestação de Blumenau, devido à atuação da proteção das barras de 525kV, apesar dos equipamentos de proteção da rede terem isolado o problema, mais de 2 milhões de consumidores ficaram sem energia (LISBÔA, 2001).

d) O blecaute de 21/01/2002 deixou 30% do Brasil sem energia elétrica atingindo 10 estados brasileiros. Em algumas regiões levou mais de 4 horas para que o fornecimento de energia elétrica fosse normalizado (PAMPLONA, 2002). O desligamento em cascata foi iniciado pelo rompimento de um cabo da linha de transmissão de propriedade da Companhia Transmissora de Energia Elétrica de São Paulo (CTEEP) que interliga a usina de Ilha Solteira à subestação de Araraquara (SP) (BILLI, 2002).

Interrupções no fornecimento de energia elétrica causam muitos transtornos à sociedade com fortes impactos econômicos e financeiros. GOMES et al. (2002), estimam que o custo unitário médio de interrupção, no Brasil, é de 1,54 US\$/kWh e que o blecaute de 11/03/1999 representou um custo de US\$ 140 x 10<sup>6</sup> .

As empresas do SEB, baseadas nas suas experiências com blecautes, definiram estratégias de recomposição do sistema. Atualmente, no Brasil, a filosofia de recomposição

é elaborada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) com a participação das empresas do setor elétrico, e está definida no documento Procedimentos de Rede (ONS, 2000) e é dividida em duas fases: a fase fluente e a fase coordenada.

A fase fluente tem por objetivo restabelecer o máximo de carga com segurança e rapidez de uma determinada região do sistema elétrico. Assim, empresas de transmissão, como a ELETROSUL, elaboram uma série de planos para a fase fluente em consonância com as definições do ONS. Estas estratégias de recomposição são compiladas em manuais de operação conhecidos como Instruções Operacionais (IOs). Baseado nestas IOs e a partir das informações do sistema elétrico obtidas através dos sistemas digitais de supervisão e controle, o operador de uma subestação, ou de um centro de operações de subestações, decide a ação a ser tomada para a recomposição do sistema.

A fase de recomposição coordenada envolve informações e procedimentos que são coordenados pelos centros regionais do ONS, com o objetivo de interligar as diversas regiões que foram atendidas pela fase fluente.

Os operadores de subestações de transmissão, na maior parte do tempo, operam o sistema efetuando situações de manobras corriqueiras, como ajuste de posição de *tap*<sup>1</sup> de transformadores para controle de tensão. Porém, distúrbios são inevitáveis, podendo levar o sistema elétrico a uma condição de falta e, nas condições mais graves, a um blecaute.

Uma das medidas utilizadas pelas empresas operadoras de sistema é promover treinamento para seus operadores, para capacitá-los a operarem o sistema também em situações de blecaute, haja vista que são poucos os operadores que têm experiências com grandes desligamentos.

Uma das ferramentas que permitem simulações de casos com objetivo de treinamento é o conhecido *Operating Training System (OTS)*, porém, exige investimentos cujo custo, por vezes, faz com que muitas empresas não incorporem este tipo de sistema para treinamento de seus operadores.

No momento de um blecaute geralmente as condições elétricas do sistema são adversas e de difícil controle. Soma-se que neste momento os operadores estão sobre forte pressão com um número muito grande de alarmes para serem analisados e a decisão das ações a serem tomadas deve ser feita de uma forma rápida e segura.

---

<sup>1</sup> A mudança de posição de *tap* refere-se à mudança da relação de transformação de um transformador de potência.

GOMES et al. (2002) recomendam "desenvolver mecanismos e ferramentas para operação do sistema em tempo real", com o objetivo de agregar mais segurança à operação do sistema.

Ferramentas de Inteligência Artificial, como os Sistemas Especialistas (SE), vêm sendo empregadas por empresas do SEB para auxiliar os operadores na tomada de decisão durante um blecaute.

Este trabalho descreve a construção de um Sistema Especialista, peça integrante do protótipo de um Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão (SART), para recomposição do sistema de transmissão de uma subestação da ELETROSUL.

O sistema foi desenvolvido para auxiliar o operador não somente após uma ocorrência que tenha ocasionado o desligamento total da subestação, mas também após desligamentos parciais da subestação. Este sistema busca orientar e auxiliar o operador de subestações, seja esta controlada localmente ou através de centros de operação que concentram a operação de mais de uma subestação, para uma tomada de decisão rápida e segura, em um momento crítico como o da recomposição, em tempo real, da transmissão. O sistema permite que as instruções operacionais e outros conhecimentos do especialista possam ser representados e utilizados.

Nortearam o desenvolvimento do protótipo características de sistemas abertos, como a portabilidade<sup>2</sup>, flexibilizando o uso do sistema em plataformas de sistemas supervisores compostos de *hardware* e/ou *software* diferentes.

O protótipo SART foi desenvolvido no âmbito do Mestrado Profissional, patrocinado pela ELETROBRÁS/PRODESPO em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina.

## 1.2 As Empresas de Transmissão na Nova Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro

Assim como vem acontecendo em vários países, o SEB está em processo de profundas mudanças estruturais e institucionais. Estas mudanças foram iniciadas com a

<sup>2</sup> Portabilidade significa a capacidade do mesmo programa rodar em plataformas de *hardware* e/ou *software* diferentes (AZEVEDO e OLIVEIRA, 2001).

chamada lei de concessões de 1995<sup>2</sup> que redefine o papel de empresas de energia, como a ELETROSUL<sup>3</sup>.

O conceito econômico que norteia estas mudanças é aquele onde a energia elétrica é vista como um produto ou *commodity*, que ao ser separada comercialmente da transmissão, passa a ser vista como um serviço (HUNT et al., 1996). Associa-se a isto o interesse de redução da participação do Estado e aumento de agentes privados no setor, com o objetivo de atrair investimentos e criar um modelo competitivo para o SEB. Assim, empresas de energia elétrica são desmembradas em empresas independentes de geração e transmissão num processo denominado desverticalização do setor elétrico, criando-se a indústria de energia elétrica com agentes distintos de geração, transmissão e comercialização.

Neste contexto, surgiram a Agência Nacional de Energia Elétrica, agência responsável pela regulação, controle e fiscalização do SEB; o Operador Nacional do Sistema, responsável pela operação do sistema de forma segura, econômica, técnica e eletricamente eficientes; o Comitê Coordenador do Planejamento do Sistema (CCPE), responsável pelo planejamento da expansão e o Mercado Atacadista de Energia (MAE) que é o ambiente onde ocorrem as transações de compra e venda de energia.

A pretendida competição se dará nos segmentos de geração e comercialização, uma vez que a transmissão e distribuição possuem características de monopólio natural, onde a eficiência econômica está em ter apenas um agente atuando no fornecimento do serviço. A disponibilização de energia para venda pelos geradores e a compra pelos comercializadores em qualquer ponto da rede é garantida com o livre acesso destes à rede de transmissão e distribuição. Para isto, foi definida a Rede Básica de Transmissão<sup>4</sup>, na qual é garantido o livre acesso aos agentes de geração e distribuição.

Devido às características de monopólio dos agentes de transmissão e distribuição, a ANEEL exerce poder regulatório técnico, econômico e de qualidade sobre as empresas de transmissão e distribuição.

A remuneração da transmissão é definida e regulada pela ANEEL com uma receita baseada na recuperação dos investimentos, serviços de operação e manutenção do sistema.

<sup>2</sup> Lei 8.987 de 13/02/1995 e 9.074 de 07/07/1995.

<sup>3</sup> Lei 8.987 de 13/02/1995 e 9.074 de 07/07/1995.

<sup>4</sup> A Resolução da ANEEL no. 066 de 16/04/1999 define a Rede Básica do Sistema Elétrico.

A ANEEL define também os novos projetos de expansão da transmissão e a concessão desta expansão, ou seja, a implantação de novas linhas e subestações será feita através de um processo licitatório em que o proponente que oferecer o menor preço para remuneração do uso do sistema de transmissão, terá a concessão. Com isso, busca-se a eficiência econômica do uso da transmissão.

O modelo tarifário baseado em preço, que era adotado no Brasil quando a cadeia produtiva de energia elétrica era um monopólio verticalizado, trazia embutido em suas tarifas os custos de geração, transmissão, serviços e qualidade de fornecimento, isto é, a tarifa não diferenciava a contribuição de cada segmento produtivo do sistema elétrico e permitia ainda o repasse dos custos de investimento de expansão e qualidade, o que comprometia a eficiência econômica. No novo modelo desverticalizado, é possível identificar, na cadeia produtiva de energia, os custos de geração e serviços de transmissão. A geração participa no mercado de forma concorrencial desejando poder disponibilizar a sua oferta e participar no mercado onde lhe for mais conveniente, enquanto a transmissão, com a remuneração definida, procura maximizar a receita fixa que lhe é destinada. No final da cadeia estão comercializadores e consumidores. Estes desejam ter suas necessidades atendidas, e não desejam correr risco de falta seja por limitações de rede de transmissão ou seja por ficarem expostos a custos decorrentes de disponibilidade de oferta de energia elétrica.

Para atender aos interesses dos geradores, comercializadores e consumidores, os sistemas de transmissão devem atender aos Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para as Instalações que foram definidos pelo ONS e homologados pela ANEEL, no Módulo 2 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2000). Neste documento, estão descritos as responsabilidades e os requisitos que devem ser atendidos pelo ONS, pelo agente de transmissão e por aqueles que se conectam à Rede Básica. Também estão definidos os padrões de desempenho de tensão, frequência nas diversas condições operacionais e limites que devem ser assegurados pelo agente de transmissão, além dos indicadores que servirão para avaliação da continuidade do serviço da transmissão, a saber:

- Duração da Interrupção do Serviço da Rede Básica no Ponto de Controle (DIPC), dado em minutos por período de apuração e definido como o somatório da duração das interrupções maiores ou iguais a 1 minuto;



- Frequência da Interrupção do Serviço da Rede Básica no Ponto de Controle (FIPC), dado em ocorrências por período de apuração e definido como o número interrupções com duração maior ou igual a 1 minuto;

- Duração Máxima da Interrupção do Serviço da Rede Básica no Ponto de Controle (DMIPC), definido como a duração máxima da Interrupção.

Os indicadores acima, comparados com padrões que serão definidos pelo ONS e homologados pela ANEEL, permitirão avaliar desvios e recomendar ações para adequação da Rede Básica, além de poder avaliar o desempenho do agente de transmissão e definir penalidades pelo não atendimento aos padrões estabelecidos. Assim, é interesse das empresas de transmissão maximizar a disponibilidade de suas instalações, evitando a diminuição da sua receita.

A operação do sistema elétrico de potência no Brasil é realizada por centros de operação distribuídos de forma hierarquizada definida no documento Procedimentos de Rede (ONS, 2000). Estes centros de operação são responsáveis pela operação, em tempo real, do sistema elétrico. Cada centro possui funções específicas em sua área de atuação.

A maioria das empresas de transmissão operam suas instalações na própria subestação, ou a partir de um centro de operação que permite controlar várias instalações, ficando as subestações sem a presença de operadores locais. Estas subestações ou centros de operação geralmente são dotados de Sistemas Digitais de Supervisão e Controle. Esta tem sido a tendência das empresas de transmissão, que buscam a redução de seus custos com a maximização do serviço de operação ( FLORES et al., 1999).

As ações de recomposição do sistema, ou seja, manobras, energização e desenergização de equipamentos e linhas de transmissão, são responsabilidade dos agentes proprietários dos equipamentos. As empresas de transmissão, através de seus centros de operação regionais ou na própria subestação, supervisionam, comandam e executam as ações operativas das suas instalações.

As empresas de transmissão devem buscar um desempenho do sistema com alto índice de disponibilidade e, nos casos de desligamentos, promover o restabelecimento do sistema no menor espaço de tempo possível de forma segura, garantindo a maximização da remuneração definida para o serviço de transmissão. Um tipo de ferramenta que vem sendo empregada para auxiliar o operador na recomposição de sistemas de transmissão são

os Sistemas Especialistas (SE), que é uma técnica de IA capaz de representar e processar o conhecimento de forma semelhante ao de um especialista humano.

O auxílio que este tipo de ferramenta provê ao operador são orientações do que ele deve fazer durante a recomposição do sistema, com o objetivo de reduzir o tempo de recomposição e o risco de falha humana.

### 1.3 Objetivos deste Trabalho

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo de um SE para recomposição na fase fluente do sistema de transmissão, e a verificação das vantagens e limitações de se representar procedimentos contidos nas instruções de operação em forma de regras em base de conhecimento.

Este protótipo consiste em utilizar uma plataforma de desenvolvimento de sistemas fundamentado em regras prontas e atualmente disponíveis para uso, com características de sistemas abertos, permitindo que a ferramenta possa ser usada em plataforma de *hardware* e *software* diferentes.

O objetivo é que o SART possua interface com um Sistema de Supervisão e Controle (SSC), parte integrante de um *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) que é apresentado no capítulo 2 deste trabalho. Esta interface permite que o SART seja configurado e testado a partir de dados reais de uma subestação de transmissão. Também, que o desenvolvimento do SE seja feito a partir das IOs atualmente utilizadas pelos operadores. O SSC e o SE são configurados para a subestação de Areia, de propriedade da ELETROSUL.

Serão feitas simulações no sistema SSC objetivando avaliar o sistema para o uso na operação em tempo real durante uma recomposição.

### 1.4 Organização deste Trabalho

No capítulo 2 é feita uma introdução aos conceitos gerais empregados na operação e recomposição de sistemas de potência e às filosofias utilizadas para recomposição, destacando a filosofia adotada atualmente no Brasil. Ainda neste capítulo, é apresentado

um conjunto de problemas que comumente são encontrados durante a recomposição de sistemas de transmissão, e como estes problemas são tratados no Brasil, durante a fase fluente.

Publicações relevantes à aplicação de Sistemas Especialistas na recomposição de sistemas de transmissão são apresentadas no capítulo 3. Neste capítulo, também é feito um paralelo entre as características dos Sistemas Especialistas e as de operação de Sistemas de Transmissão.

Já no capítulo 4, é descrito o desenvolvimento do sistema especialista baseado em regras, o processo de aquisição e representação do conhecimento contido nas IOs, os testes realizados e a abordagem feita para a subestação de Areia com os resultados obtidos nas simulações.

Por fim, no capítulo 5, estão as conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2    Recomposição de Sistemas de Potência**

### **2.1   Introdução**

Neste capítulo é feita uma introdução à operação de sistemas de potência, apresentado-se conceitos gerais de operação do sistema, com enfoque na recomposição de sistemas de transmissão de energia elétrica.

A complexidade e abrangência dos aspectos relacionados à recomposição de sistemas elétricos, além da sua importância para a operação de sistemas de potência, permitem que um grande número de contribuições sejam apresentadas na forma de publicações técnicas sobre recomposição de sistemas de potência para os sistemas de transmissão.

O Brasil adota uma filosofia de recomposição baseada em duas fases: a fluente e a coordenada. Na fluente, como o nome indica, o objetivo é que a recomposição possa fluir sem a intervenção de centros de operação, isto é, os operadores de usinas e subestações iniciam a recomposição do sistema a partir de suas unidades operativas atendendo uma parcela da carga do sistema, definidas como cargas prioritárias. O atendimento das demais cargas e a interligação das ilhas ocorrem na fase coordenada, sob a supervisão de um centro de operação operado pelo ONS ou contratado deste.

Esta filosofia é baseada em estudos preliminares para a elaboração de IOs que são disponibilizadas aos operadores de subestações de transmissão em forma de manuais. Os operadores devem seguir as instruções contidas nestes manuais para executarem a recomposição do sistema.

Os assuntos, neste capítulo, são apresentados partindo do que é encontrado na literatura, buscando um paralelo com o sistema brasileiro.

No item 2.2, deste capítulo, é apresentada uma introdução à operação de sistemas de potência onde procurando-se mostrar que a distinção entre os sistemas exige considerações particulares para cada um na promoção da recomposição.

A classificação dos estados operativos do sistema é apresentada no item 2.3 com enfoque nas empresas de transmissão, destacando-se no item 2.4 o estado restaurativo, que no caso brasileiro é fundamentado na filosofia de recomposição expressa através das IOs.

Nos itens 2.5, 2.6 e 2.7 está descrito como é processada a recomposição no Brasil. No item 2.5, faz-se uma apresentação da distribuição hierárquica da operação atualmente definida no modelo brasileiro, e também dos sistemas SCADA utilizados na operação de sistemas de transmissão. No item 2.6, é feito um pequeno histórico do surgimento da filosofia de recomposição no Brasil, os objetivos desta filosofia e as fases em que ela é dividida, destacando-se a fase fluente da recomposição.

No item 2.7, são enumerados os vários problemas que são encontrados durante uma recomposição de sistemas elétricos, procurando apresentar, para cada item, o que é encontrado na literatura referente a outros países e como é resolvido, no Brasil, dentro da filosofia de recomposição atualmente adotada.

As conclusões encontram-se no item 2.8 que aponta o SE como uma ferramenta capaz de auxiliar o operador durante uma recomposição.

## **2.2 Uma Introdução à Operação de Sistemas de Potência**

Tradicionalmente, os sistemas de potência são divididos em segmentos de geração, transmissão e distribuição. A geração é caracterizada principalmente por usinas de energia elétrica de origem hidráulica, nuclear ou térmica a carvão ou gás. A energia gerada nestas usinas é transportada até os consumidores através do segmento de transmissão e distribuição. Tanto a transmissão quanto a distribuição são compostas por linhas de transmissão e subestações. O que diferencia a transmissão da distribuição são os níveis de tensão em que operam e a quantidade de energia que transportam. Usualmente, o segmento de transmissão é caracterizado por linhas que operam em tensões de 230 kV ou superiores, enquanto que o de distribuição opera em níveis mais baixos com as tensões adequadas para as necessidades dos centros consumidores e pela topologia de suas redes. Enquanto a rede de distribuição possui uma forma radial, os circuitos de transmissão são interligados formando anéis.

A filosofia de operação basicamente segue a mesma divisão do sistema de potência, ou seja, existem responsáveis pela operação das usinas, dos sistemas de transmissão e

distribuição e acrescenta-se um segmento de operação, conhecido como operador nacional do sistema, que possui informações de todo o sistema de potência. Assim, as empresas de geração, transmissão e distribuição possuem estruturas organizacionais para a operação de suas instalações que podem ser efetuadas a partir de equipamentos instalados no local, isto é, nas usinas e subestações, ou através de centros de operação onde concentra-se a operação de mais de uma usina e/ou subestação. O operador do sistema por sua vez, tendo a visão sistêmica global, é responsável por operar o sistema em condições estáveis e seguras, coordenando e supervisionando, através de um ou mais centros de operação, as ações de operação das usinas e subestações.

Estruturas hierarquizadas são utilizadas para a operação do sistema elétrico, nas quais os centros de operação com visão sistêmica assumem o topo da estrutura, enquanto que os que estão na base têm informações detalhadas da unidade em que operam, porém, não possuem a visão global do sistema.

Para cada centro ou unidade de operação são atribuídas funções específicas de acordo com a particularidade do sistema que operam. Quanto mais complexo for o sistema e maior o número de unidades geradoras, linhas e subestações que compõem este sistema, maior será a complexidade e necessidade de recursos para auxiliar os operadores no cumprimento de suas atividades.

Os centros de operação com posição hierárquica superior têm como atribuição o controle da tensão e frequência, controle da quantidade da energia gerada pelas usinas (despacho de geração), otimização e eficiência do sistema eletroenergético, enquanto que ações relativas a manobras e operação de instalações estão a cargo de operadores de usinas e subestações.

Apesar de cada unidade de operação ter funções específicas para operar a sua unidade, existe uma interdependência entre estas unidades e muitas vezes uma ação operacional é executada em determinada unidade para complementar outra ação que pode ter sido iniciada em outra unidade operativa. Como o sistema é interligado, estas ações são coordenadas pelos centros de operação em posição hierárquica superior.

Cabe à operação dos sistemas de transmissão, através dos operadores de subestações, a execução de comandos dos equipamentos na efetivação de manobras da subestação. Estas manobras têm papel fundamental para o bom desempenho do sistema elétrico, especialmente durante a recomposição do sistema após um blecaute.

Estudos, simulações, estratégias e técnicas de recomposição passaram a ser seriamente considerados pelas empresas e instituições ligadas ao setor elétrico internacional após os grandes blecautes ocorridos nos anos 60 e 70 nos Estados Unidos, o que refletiu em um grande número de publicações (ADIBI et al., 2000). A literatura tem apresentado uma grande quantidade de publicações voltadas para o tema com diversas propostas de soluções para a recomposição. Como cada sistema possui características particulares, muitas soluções adotadas para estes sistemas não se aplicam a outros. Podemos citar como exemplo as soluções em que são consideradas as usinas térmicas a carvão no processo inicial de recomposição. MELLO e WESTCOTT (1994) mostram que estas usinas possuem complexos sistemas de partida e parada de suas unidades, envolvendo tempos de entrada e saída de operação de equipamentos que devem ser respeitados devido ao processo termodinâmico e de projeto destes equipamentos. Assim, soluções de sistemas com base térmica diferenciam-se daqueles que baseiam-se exclusivamente em usinas hidráulicas para o processo inicial de recomposição, como no caso brasileiro.

### **2.3 Os Estados Operativos do Sistema**

A maior parte do tempo o sistema de potência opera sem distúrbios ou ocorrências de grandes proporções e apenas atividades rotineiras de operação são executadas para manter o sistema dentro de requisitos programados. Em sistemas de transmissão estes ajustes são principalmente o controle de tensão de barras, através de posicionamento de tap de transformadores. Entretanto, distúrbios no sistema são inevitáveis e, na maioria das vezes, impossíveis de prever, provocando desligamentos. Para trazer o sistema ao estado normal é necessário um conjunto de ações operacionais que devem ser efetuadas com segurança e no menor tempo possível.

Em WU e MONTICELLI (1988), NADIRA et al. (1992) e KOSTIC (1997) a operação do sistema de potência é representada matematicamente pelo atendimento de dois conjuntos de restrições: de igualdade e de desigualdade. A restrição de igualdade refere-se ao atendimento da carga, enquanto que as restrições de desigualdade são as operacionais e de segurança do sistema.

As restrições de carga referem-se ao equilíbrio do balanço de carga do sistema (fluxo de potência), isto é, o atendimento das cargas do sistema considerando os limites de tensão do sistema. Por sua vez, as restrições operacionais são aquelas em que se verifica o carregamento das linhas, transformadores e demais dispositivos de transmissão e operação. Finalmente, as restrições de segurança são interpretadas como a capacidade do sistema operar com reserva de contingência, isto é, a capacidade do sistema de absorver distúrbios e/ou faltas.

A apresentação dos estados operativos do sistema, feita aqui, baseia-se nas publicações de GUTIÉRREZ et al., (1987), WU e MONTICELLI (1988), NADIRA et al., (1992) e KOSTIC (1997).

Os estados operativos do sistema são classificados como normal, emergência, restaurativo e extremo e estão representados no diagrama da figura 2.1.

O estado normal seguro é caracterizado pelo atendimento de todas as cargas do sistema, com tensão e frequência dentro dos limites considerados normais. Os geradores, equipamentos e linhas de transmissão operam sem sobrecargas, e o sistema tem capacidade

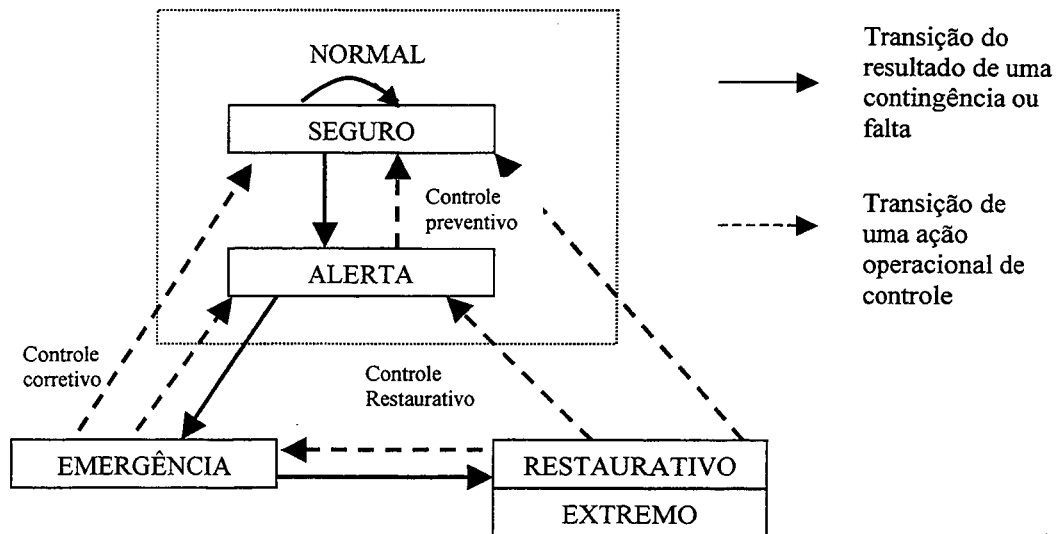


Figura 2.1 - Estados operativos do Sistema de Potência

de suportar determinada contingência. Em normal alerta, por sua vez, há violação de alguma restrição de segurança, ou seja, existe a probabilidade de ao menos uma contingência levar o sistema para o estado de emergência, GUTIÉRREZ et al., (1987). No estado normal alerta as ações de controle têm caráter preventivo.



Quando alguma das restrições operacionais não é atendida diz-se que o sistema está no estado de emergência. Neste estado, as cargas continuam sendo atendidas, mas estão sendo alimentadas com violações de tensão, frequência e/ou sobrecarga do sistema de transmissão. As ações tomadas neste estado têm como objetivo a normalização do sistema e são chamadas de controle corretivo.

O estado restaurativo é caracterizado neste trabalho pela perda de integridade do sistema de transmissão com a saída de operação de algum componente do sistema, como linha ou transformador, podendo ocorrer corte de carga.

Cabe lembrar que esta definição leva a algumas divergências conceituais com alguns dos autores de artigos citados neste item. Por exemplo, para WU e MONTICELLI (1988), o estado restaurativo é caracterizado por perda de carga no sistema, porém com o enfoque para sistemas de transmissão consideramos que o desligamento de um componente da transmissão pode provocar corte de cargas no sistema, assim o corte de carga pode ser uma consequência deste desligamento.

As ações tomadas para normalização do sistema de transmissão, são definidas como ações de controle restaurativo.

Por fim, o estado extremo é uma condição crítica do estado restaurativo, nele há corte de carga no sistema e todas as restrições estão violadas. Isto caracteriza um desligamento de grandes proporções comumente chamado de blecaute. As ações neste estado também são as de controle restaurativo.

A tabela abaixo faz um resumo destes estados e as condições restritivas que caracterizam cada estado operativo.

Estado Operativo do Sistema	Restrição de igualdade	Restrição de desigualdade		
		Restrição de operação		Restrição de segurança
	Carga	Tensão e frequência	Linhas e transformadores	Segurança
Normal Seguro	Atendida	Sem violação	Sem violação	Sem violação
Normal Alerta	Atendida	Sem violação	Sem violação	Com violação
Emergência	Atendida	Com violação	Com violação	Com violação
Restaurativo	Pode haver violação	Pode haver violação	Com violação	Pode haver violação
Extremo	Corte/ilhamento	Com violação	Com violação	Com violação

Figura 2.2 Estados operativos do sistema e condições de restrição

## 2.4 O estado restaurativo

Sob o ponto de vista da transmissão, caracteriza-se o estado restaurativo quando, após um desligamento, equipamentos que pertencem ao sistema de transmissão estão disponíveis para serem energizados, permitindo sua reintegração ao sistema com vistas à operação do sistema no estado normal.

Quando ocorre um blecaute, condição extrema de estado restaurativo, NADIRA et al. (1992) e SHAHIDEPOUR e KIRSCHEN (1992), formulam o problema de controle restaurativo como um problema de otimização com múltiplos objetivos e combinatorial, sendo o objetivo principal neste estado é o atendimento de um maior número de cargas no menor tempo possível. A maximização de cargas deve obedecer limitações do sistema de potência, pois ao maximizar as cargas, por exemplo, pode-se causar um declínio de frequência, comprometendo a estabilidade do sistema e ocasionando a operação dos dispositivos de proteção e, conseqüentemente, causar novos desligamentos.

São muitas as propostas e filosofias apresentadas para recompor sistemas de potência, sendo que muitas destas propostas estão baseadas nas experiências das empresas. Como apresentado por GUTIÉRREZ et al. (1987) e KEARSLEY (1987), a maioria das empresas adotam planos de recomposição. Estes planos são elaborados a partir de uma série de estudos com o auxílio de ferramentas computacionais de simulação numérica (ADIBI et al., 1987b). Fundamentados nos resultados destes estudos, os especialistas elaboram os planos com a produção de manuais a serem usados pelos operadores como instruções para a recomposição do sistema após uma falta no sistema de potência.

O Brasil também adota a filosofia de recomposição baseada em estudos preliminares com a elaboração de um plano de recomposição. Atualmente, a filosofia de recomposição do sistema de potência no Brasil está definida no Manual de Procedimentos da Operação (MPO) do ONS (ONS, 2000).

Uma breve descrição desta filosofia é apresentada neste trabalho, nos itens a seguir.

## 2.5 A Operação do Sistema no Novo Cenário do Setor Elétrico Brasileiro

As mudanças ocorridas no SEB redefiniram as atribuições de cada agente participante do sistema de potência no Brasil, sendo que a operação do sistema de forma

segura, econômica, técnica e eletricamente eficientes é uma atribuição do ONS e é feita através dos seus centros de operação, enquanto que os agentes de geração, transmissão e distribuição são responsáveis pela operação de suas instalações.

Estas atribuições estão definidas no módulo 10 do documento Procedimentos de Rede (ONS, 2000) e a operação do sistema obedece a forma hierárquica conforme representado, de forma simplificada, na fig. 2.3. Cabe ao CNOS a operação dos sistemas

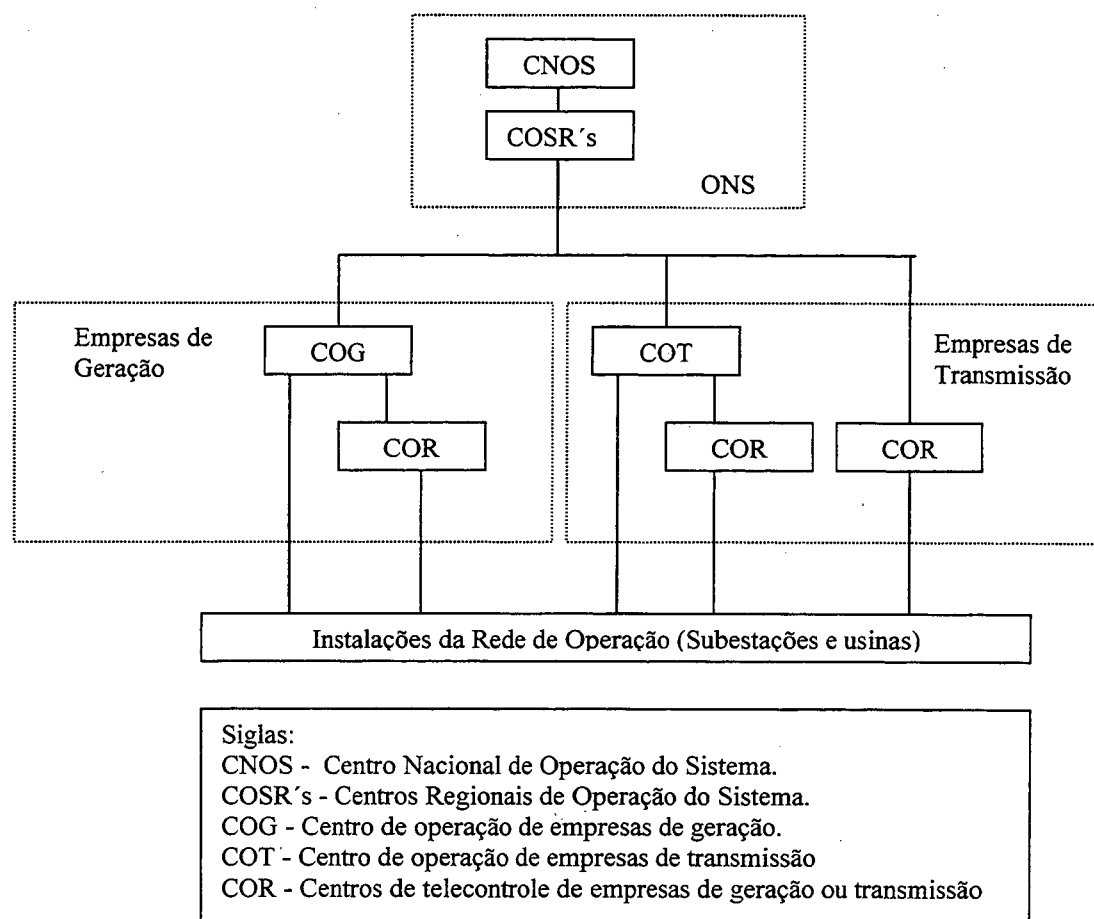


Fig. 2.3 – Estrutura hierárquica operacional do sistema elétrico brasileiro

das interligações internacionais, dos sistemas de reservatórios e das bacias hidrográficas. Os COSR são responsáveis pela adequação da geração e carga e por manter o sistema dentro de limites de tensão e frequência. Os centros de operação dos agentes de geração (COG), de transmissão (COT) e de geração e transmissão (COR) são responsáveis pela supervisão e/ou execução da operação de seus ativos.

No Brasil, onde a energia elétrica é basicamente de origem hidráulica, as usinas encontram-se distantes dos centros de carga. Os sistemas de transmissão usualmente cobrem áreas geográficas relativamente grandes e, conseqüentemente, as interconexões dos pontos de geração às cargas exigem longas linhas de transmissão.

É essencial para a operação da transmissão a monitoração contínua do perfil de tensão das barras, carregamento das linhas e demais equipamentos com o objetivo de manter as linhas e equipamentos dentro dos limites considerados operacionais e as tensões conforme definido pelo ONS.

Atualmente, a supervisão e operação em tempo real de subestações de transmissão é feita utilizando-se recursos da tecnologia digital que substituiu a operação convencional que era feita através de painéis, mesas de operação com botoeiras, chaves seletoras, etc.. Os sistemas digitais permitem que informações do processo como tensão, freqüência, potência, estado dos equipamentos e eventos sejam processados por sistemas SCADA, e disponibilizados ao operador através de funções tradicionais de um SSC, como sinalização de estados de equipamentos através de telas de unifilares, valores medidos de variáveis analógicas, processamento de alarmes e seqüência de eventos. Também é possível o comando remoto de equipamentos, tais como disjuntores, chaves seccionadoras e tap de transformadores.

A norma IEEE Std C37.1 (IEEE, 1994) define o sistema SCADA como composto por um Sistema de Supervisão e Controle (SSC), Unidades Terminais Remotas (UTR), rede de comunicação e equipamentos de campo.

O SSC é composto por *hardware* e *software* que processam os dados recebidos da rede de comunicação, transformando-os em informações que possam ser entendidas pelos operadores e apresentadas através de telas que representam os unifilares de subestações, telas de alarmes e seqüência de eventos registrados com precisão de milissegundos. O SSC pode estar instalado distante da subestação que está sendo monitorada ou em instalações próximas à subestação.

Subestações construídas antes do advento da tecnologia digital utilizam as Unidades Terminais Remotas para adquirir os dados analógicos e digitais dos diversos sensores instalados nos equipamentos da subestação, bem como para processar o envio de sinais de comando aos disjuntores, chaves seccionadoras e tap de transformadores. As subestações com tecnologia digital que utilizam os dispositivos *Intelligent Electronic Devices* (IEDs)

diferenciam-se das UTRs pela tecnologia que adotam, mas sob o ponto de vista operacional também aquisitam dados, processam e os enviam para o SSC.

A comunicação de dados entre as UTRs e os SSC obedecem protocolos padronizados e utilizam diversos meios de comunicação, tais como: a fibra ótica, o micro-ondas e as linhas privadas discadas ou não.

Os equipamentos de campo são os relés, os sensores de posição, os transdutores de tensão e corrente e os controladores da subestação.

A figura 2.4, abaixo, mostra, de forma esquemática, os componentes do sistema SCADA.

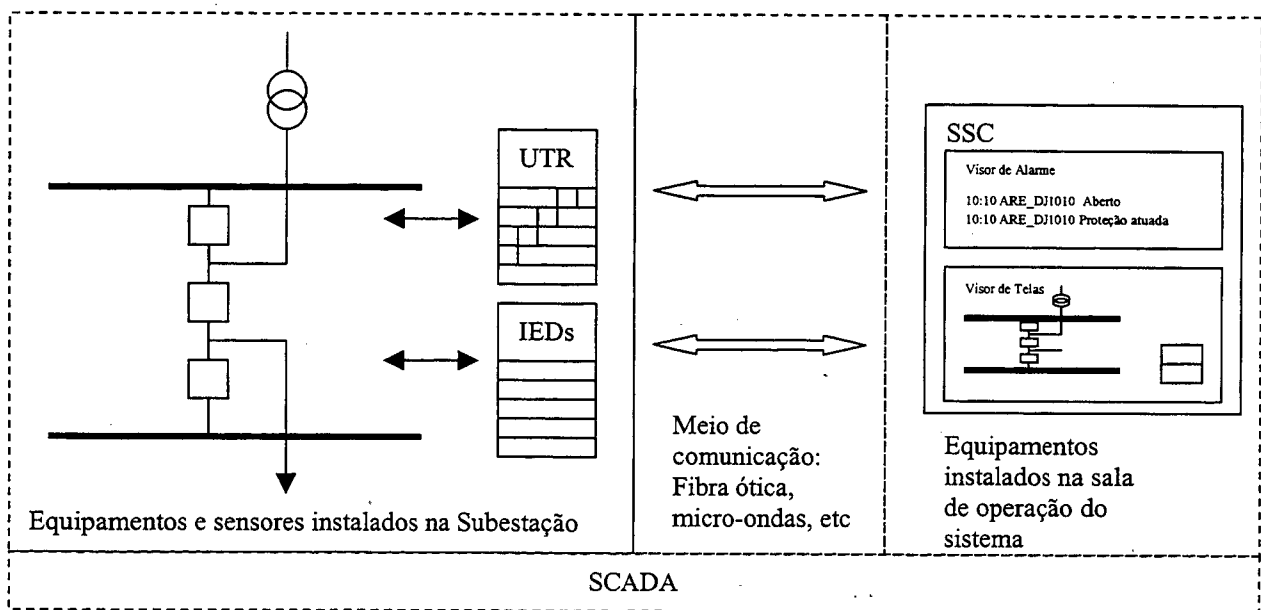


Figura 2.4 Componentes do SCADA

Além das funções tradicionais dos Sistemas de Supervisão e Controle, existem funções avançadas para a operação em tempo real que estão consolidadas na operação e podem ser incorporadas ao SSC com o objetivo de complementar e aumentar a confiabilidade dos dados e da operação do sistema. Para a transmissão podemos destacar as funções de estimação de estados e análise de contingências, que utilizam métodos numéricos baseados em algoritmos matemáticos. O estimador de estados a partir de medições redundantes e dos estados de chaves e disjuntores, fornece os estados (tensão complexa, ou seja, módulo e ângulo de fase, em todas as barras) do sistema com a capacidade de detectar e identificar medidas portadoras de erros grosseiros que de outra

forma contaminariam as estimativas. Por sua vez, a análise de contingência, permite que o operador possa observar índices de segurança do sistema, e a partir de informações da condição de risco tomar medidas que evitem ou minimizem os riscos de uma falta (controle preventivo).

O *Operating Training System* (OTS) permite que sejam feitas simulações de distúrbios no sistema, de forma que os operadores sejam treinados para agir com segurança e eficácia nestas situações, já que uma das tarefas mais importantes e exigentes para a operação em tempo real de um sistema de transmissão de energia elétrica é recompor o sistema após um distúrbio de grandes proporções, um blecaute.

As ações de recomposição do sistema, ou seja, manobras, energização e desenergização de equipamentos e linhas de transmissão são de responsabilidade dos agentes proprietários dos equipamentos. As empresas de transmissão, através de seus centros de operação, supervisionam, comandam e executam as ações operativas das suas instalações em condições normais e em caso de distúrbios.

## **2.6 A Recomposição de Sistemas de Potência no Brasil**

### **2.6.1 Considerações Iniciais Sobre a Recomposição de Sistemas de Potência no Brasil**

No Brasil, assim como em outros países, foram os blecautes que motivaram a adoção de filosofias, estudos e aprimoramentos das técnicas de recomposição de sistemas de potência.

Na década de 70 houveram grandes perturbações no sistema da Região Sul. A experiência das empresas do setor elétrico desta região ajudaram na definição de uma estratégia para agilizar o restabelecimento das cargas após um blecaute. O conceito central da estratégia está fundamentado na descentralização dos procedimentos operativos, uma vez que, até então, os operadores de subestações somente executavam operações que fossem autorizadas pelos Centros de Controle. Esta centralização fazia com que após a ocorrência de desligamentos de grandes proporções houvesse um congestionamento de ligações direcionadas aos Centros de Operação, impedindo que se efetuasse a recomposição do sistema de forma mais eficiente.

Devido aos blecautes ocorridos em 1984 e 1985 na Região Sudeste, associados aos problemas encontrados para a recomposição do sistema e a necessidade de uma definição de filosofia de recomposição, o GCOI (Grupo Coordenador para Operação do Sistema Interligado) determinou a implantação do “Plano Estratégico Nacional de Restabelecimento em Situações de Emergência”; assim surgiu o documento “Filosofia e Critérios de Recomposição do Sistema Interligado Brasileiro” (GCOI, 1998).

Hoje, a filosofia de recomposição está definida no documento “Procedimentos de Rede” (ONS, 2000) no Manual de Procedimentos da Operação, elaborado pelo ONS, e que adota o mesmo critério do documento do “Filosofia e Critérios de Recomposição do Sistema Interligado Brasileiro” elaborado pelo extinto GCOI.

Esta filosofia baseia-se na definição de áreas autônomas, na recomposição processada em duas fases e na elaboração de instruções operacionais a partir de um plano de recomposição baseado nestas áreas e fases de recomposição, (ALMEIDA et al., 1995).

As áreas autônomas são conhecidas como áreas de auto-restabelecimento que são caracterizadas por um sistema elétrico que contém uma ou mais usinas, chamadas usinas de auto-restabelecimento<sup>6</sup> e uma configuração mínima preferencial de linhas de transmissão que permitem atender a um determinado número de cargas prioritárias.

No Brasil, as usinas de auto-restabelecimento são usinas hidrelétricas. A preferência por essas usinas deve-se ao fato de que após um blecaute, num curto período de tempo, elas são capazes de produzir energia elétrica.

A independência das áreas de auto-restabelecimento confere-lhes autonomia para que sejam promovidas as tomadas de carga de forma simultânea; com isto, um maior número de cargas pode ser atendido em menor prazo de tempo e de forma simultânea pelas diversas áreas de auto-restabelecimento.

As duas fases em que se processam a recomposição são a fase fluente e a fase coordenada.

A fase fluente é caracterizada pela independência da operação das usinas e subestações em relação aos centros de operação do ONS (COSR's e CNOS). Com isto, os operadores promovem o restabelecimento de cargas prioritárias das áreas de auto-

---

<sup>6</sup>Usinas de auto-restabelecimento são aquelas que têm a capacidade de iniciar a produção de energia elétrica a partir de uma condição de sistema desenergizado (*black start*).

restabelecimento, a partir das instruções operacionais, sem a necessidade de comunicação com os centros de operação hierarquicamente superiores, obtendo-se assim maior velocidade no processo de recomposição.

A fase coordenada, por sua vez, tem o objetivo de complementar a fase fluente ou quando, por restrições operativas, a recomposição não possa fluir sem comunicação com o centro de operação hierarquicamente superior.

Na fase coordenada, sob a supervisão dos centros de operação, são executadas as interligações entre as áreas de auto-restabelecimento, fechamento de circuitos paralelos, e atendimento das cargas remanescentes da fase fluente.

Os planos de recomposição são baseados nos resultados de estudos feitos por especialistas que elaboram as Instruções Operacionais que deverão ser seguidas pelos operadores para a recomposição do sistema. Estas IOs são elaboradas para cada unidade operativa; assim cada subestação possui uma IO própria para a unidade.

No plano de recomposição estão previstos os papéis específicos de cada agente para a concretização da recomposição. O agente de geração é que tem a iniciativa de promover a recomposição, disponibilizando montantes de geração que serão identificados pelos operadores das subestações para atendimento das cargas. Os centros de operação somente intervirão na fase fluente caso seja identificada alguma anormalidade ou for solicitada sua atuação pelos responsáveis da operação de usinas ou subestações.

A decomposição do processo de recomposição em múltiplos estágios associados à autonomia de cada área de auto-restabelecimento e ações de controle restaurativo, baseadas em estudos preliminares, permitem que o processo possa fluir sem a necessidade do estabelecimento de comunicação com um centro de operação hierarquicamente superior, obtendo-se maior rapidez no atendimento às cargas e maior controle sobre as respostas do sistema.

### **2.6.2 A fase fluente de recomposição**

O operador da subestação de transmissão realiza a recomposição na fase fluente a partir de instruções detalhadas dos procedimentos para a normalização de linhas e equipamentos, que estão descritas em manuais de operação. Estas instruções são elaboradas obedecendo um conjunto de critérios que observam a integridade dos equipamentos e a segurança do sistema e a partir de montantes máximos de potência



definidos para a área de auto-restabelecimento permitem atender a um certo número de cargas do sistema. Em ONS (2000) nos submódulos 21.6 e 23.3 e GCOI (1998) estão relacionados os critérios de estudos elétricos e compatibilização entre geração e carga.

a) Critérios para realização de estudos elétricos.

Nos estudos elétricos são considerados os estudos de regime permanente, de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

Os estudos de regime permanente são os que permitem definir o montante de carga prioritária que será atendida durante a fase fluente em função da disponibilidade das usinas de auto-restabelecimento, capacidade de geração ou absorção de potência reativa dos geradores e compensadores síncronos e limites de tensão operacionais dos diversos equipamentos que compõem a configuração mínima preferencial de linhas e subestações.

Os estudos de transitórios eletromecânicos visam analisar o comportamento das oscilações de tensão e frequência e sua influência sobre as máquinas rotativas do sistema; assim, pode-se limitar montantes de tomada de carga ou fechamento de circuitos em anel com o objetivo de que esforços torcionais causados nas máquinas síncronas fiquem dentro dos limites de projeto destes equipamentos. Estes estudos também permitem determinar condições de energização de linhas e transformadores de forma que os níveis de sobretensão e sobrecorrente não danifiquem nenhum equipamento do sistema.

b) Critérios para compatibilizar carga e geração

O equilíbrio entre geração e carga é premissa básica para a operação na fase fluente. Para isto, são definidos montantes de cargas a serem atendidas durante a fase fluente conhecidas como “cargas prioritárias”. O montante de carga definido é sempre compatível com a geração e a capacidade de transmissão e transformação. Assim, a carga tomada fluentemente não pode exceder a capacidade de potência da área de auto-restabelecimento. Esta disponibilidade inicial de geração é definida pela equação 2.1 a seguir :

$$P_{disp} = 0,8 * (n-1) * P_n \quad (2.1)$$

onde:

$n$  = número de unidades geradoras da usina, ou no caso em que os estudos determinem um número mínimo de unidades, então  $(n-1)$  é substituído por este número mínimo de unidades;

$P_n$  = Potência nominal por unidade em MW e

$P_{disp}$  = Potência total inicial da(s) usina(s).

A potência reativa, por sua vez, limita a carga prioritária em função do controle de tensão durante a fase fluente, isto é, a potência reativa disponibilizada é a definida pela curva de capacidade<sup>7</sup> dos geradores e capacidade dos reatores *shunt*, descartando-se, em princípio, os capacitores *shunt* e/ou compensadores síncronos ou estáticos para o controle de tensão.

Portanto, o equilíbrio entre geração e carga deve obedecer à capacidade disponível de geração e transmissão e à necessidade de controle de tensão.

Pode-se afirmar que a fase fluente tem três pontos estratégicos principais que norteiam os estudos, a elaboração das IOs e as ações de controle da recomposição:

- 1) A segurança é o ponto estratégico que precede todos os outros. Assim, pode-se considerar que outros objetivos estratégicos são sacrificados em função da segurança;
- 2) A descentralização da decisão de efetuar o processo de recomposição, com ganhos de redução do tempo de recomposição;
- 3) Definição de áreas geolétricas compostas de usinas, cargas e rotas de transmissão pré-definidas, permitindo maior controle de supervisão do processo de recomposição.

Estes pontos estratégicos são interdependentes, e são realizados sob as seguintes premissas:

- 1) O sistema parte da condição de desenergizado;
- 2) As usinas de auto-restabelecimento é que desencadeiam o processo de recomposição;
- 3) Os operadores de usinas e subestações têm autonomia para realizar a recomposição na fase fluente;
- 4) Sempre que possível, são previstas fontes alternativas de recomposição;
- 5) A tomada de carga é feita em blocos;
- 6) Os circuitos são fechados obedecendo critérios de sincronismo.

<sup>7</sup> Curva de capacidade de um gerador é um gráfico cujos eixos da curva são a potência ativa e reativa e que permite identificar a zona adequada de carregamento e operação de um gerador. (GRAIGNER et al., 1994)

A fase fluente, portanto, tem o objetivo de tornar ágil e seguro o processo de recomposição. A agilidade vem principalmente da autonomia dos operadores de usinas e subestações em iniciarem o processo de recomposição, e a segurança vem dos critérios adotados nos estudos e nas IOs que devem ser seguidas pelos operadores.

## **2.7 Problemas, Mecanismos de Solução e Controles usados para a Recomposição de Sistemas de Transmissão**

### **2.7.1 Considerações Iniciais sobre Problemas, Mecanismos de Solução e Controles Usados para a Recomposição de Sistemas de Transmissão**

A recomposição iniciou com a criação dos sistemas de potência e desde então é estudada e pesquisada.

Em 1978, foi formado, no âmbito do *IEEE Power Engineering Society (PES) System Operation Committee*, uma força tarefa com o objetivo de proporcionar um fórum de discussões sobre o tema em que possíveis problemas relacionados à recomposição pudessem ser discutidos e divulgados. Esta força tarefa publicou, em 1987, dois artigos. O segundo deles, publicado em novembro (ADIBI et al., 1987b), fez um estudo dos 19 maiores distúrbios ocorridos na América do Norte entre 1979 e 1983. Nestes 19 casos estudados foram identificados alguns problemas, entre os quais: Sistema SCADA inadequado, procedimentos desatualizados, e com maior frequência, erros operacionais de chaveamento. Neste artigo, os tipos de problemas relacionados à recomposição foram divididos em 7 categorias: balanço de potência reativa, balanço entre carga e geração, coordenação da geração e carga, controle e monitoração, energia armazenada e plano de recomposição. Os autores também descrevem alguns procedimentos de recomposição que foram comuns aos 19 casos estudados, mencionando o difícil papel dos operadores durante uma recomposição do sistema, indicando a necessidade de metodologias avançadas que possam integrar a heurística empregada pelos operadores para a solução dos problemas.

Qualquer sistema de potência está sujeito a distúrbios. Quando um sistema é bem projetado, e possui proteções ajustadas com manutenção adequada, os distúrbios podem ser isolados, evitando desligamentos em cascata; porém, quando um segmento importante do

sistema é desligado, pode levar a uma condição incontrolável de tensão e frequência provocando blecaute no sistema.

Todos os sistemas de transmissão possuem características particulares que devem ser consideradas. O sistema elétrico brasileiro é beneficiado pelo fato das usinas hidráulicas serem fontes recomendadas para iniciar a recomposição (ADIBI et al., 1994b), porém deve-se considerar as sobretensões causadas pela energização de longas linhas de transmissão existentes no sistema (ANCONA, 1995).

Na descrição que segue, procurar-se-á fazer um paralelo entre os vários problemas inerentes à recomposição, citados em alguns artigos técnicos e como estes problemas são superados pela filosofia adotada no Brasil, especialmente na fase fluente da recomposição.

### 2.7.2 Usinas de Auto-Restabelecimento

O Brasil é favorecido em usinas de auto-restabelecimento por ter seu parque gerador com quase 90% de usinas hidráulicas. Este tipo de usina não sofre restrições tão rígidas quanto as usinas térmicas para, no caso de um desligamento, voltar a operar em curto espaço de tempo (MARIANI et al., 1984).

Países como França, Inglaterra e Estados Unidos possuem uma base térmica de geração. Segundo MELLO e WESTCOTT (1994), o tempo para a partida de uma usina térmica pode ser de algumas horas ou até dias, o que depende de características de projeto como o tipo de caldeira e combustível utilizado. Também influencia o tempo de desligamento, pois a partida com a caldeira quente, morna ou fria possuem tempos diferentes para iniciar a geração de energia. Já nas usinas a gás, segundo ADIBI et al. (1987a), o tempo para voltar a operar está em torno de 15 a 30 minutos.

As usinas de auto-restabelecimento são definidas em função da sua capacidade de gerar energia elétrica independente de uma fonte externa. A capacidade de geração destas unidades respeita a curva de capacidade de cada máquina, sendo as IOs elaboradas considerando estes limites.

Para iniciar o processo de recomposição fluente, as unidades que compõem a usina de auto-restabelecimento deverão estar sincronizadas e com a tensão de partida dentro dos limites definidos nas IOs.

No futuro, com a previsão de entrada de um número expressivo de usinas térmicas, segundo BARBOSA (2002), em 5 anos, estas passarão a responder por 29,7% da geração

de energia elétrica, logo as térmicas poderão vir a ser consideradas como usinas de auto-restabelecimento.

### 2.7.3 Sobrecargas no sistema

Durante um blecaute, com formação de ilhas geoeletricas, estas ilhas operam em condições frágeis, e o sistema tem limitações elétricas e mecânicas que devem ser consideradas. Estas limitações podem ser das unidades geradoras ou do carregamento máximo admissível de equipamentos do sistema de transmissão, como linhas, transformadores de potência, transformadores de corrente e pára-raios.

Na fase fluente as IOs consideram as tomadas de cargas de forma gradativa, dando preferência a montantes reduzidos de carga, sendo o total destas cargas são limitado pela capacidade da configuração mínima preferencial de transmissão, transformação e geração.

### 2.7.4 Sobretensões em linhas e transformadores

Ao energizar longas linhas de transmissão que estão sem cargas conectadas a elas, ocorre um fenômeno conhecido como “efeito Ferranti” onde a tensão nos terminais da linha é maior do que a da extremidade onde está localizado o gerador (MORIN, 1987). Além de sobretensão devido ao transitório de chaveamento, as sobretensões podem ser oriundas também de rejeições de cargas<sup>8</sup> que podem ocorrer durante a recomposição (GCOI, 98).

Alguns equipamentos, do sistema de transmissão, são afetados pela sobretensão, principalmente, os pára-raios e os transformadores (ADIBI et al., 1992). No caso dos pára-raios deve-se evitar o disparo destes, já que isto poderia danificá-los e indisponibilizar o circuito de transmissão, prejudicando a recomposição.

Para evitar a sobretensão em linhas e transformadores, os estudos que definem as IOs levam em consideração ações que devem ser efetuadas antes de iniciar o processo de energização, como:

Colocação em operação de reatores de linha, que na maioria das vezes não são disponíveis. Segundo ALMEIDA et al.(1995) é mais comum encontrar nos

sistemas de transmissão uma maior quantidade de capacitores do que de reatores. Em regime normal de operação os capacitores melhoram os níveis de tensão, mas dificultam a recomposição quando as linhas estão energizadas com pouca ou nenhuma carga;

Retirada de operação dos bancos de capacitores;

Colocação em diferentes posições dos taps de transformadores que operam em paralelo, com o objetivo de aumentar a corrente de circulação e consumo de potência reativa.

Posicionamento do tap de transformadores em posições que não impliquem em sobretensão no sistema;

Energização de linhas com cargas prioritárias. A quantidade de carga prioritária deve considerar a disponibilidade de potência reativa das usinas e as limitações do sistema de transmissão;

Disponibilidade de potência reativa das usinas de auto-restabelecimento respeitando a curva de capacidade das usinas geradoras.

Também são considerados, durante os estudos, o atendimento dos seguintes limites:

Admite-se para equipamentos energizados em vazio, 110% da tensão nominal como limite aceitável de tensão;

Admite-se o fator de potência entre 0,85 e 0,95 para as cargas prioritárias.

Durante a fase fluente são admitidos níveis de tensão mais “relaxados” do que os da fase coordenada e operação normal do sistema. Nos estudos também são considerados casos especiais que necessitem de restrições mais rígidas devido às características de equipamentos que operam em faixas mais estreitas de variação de tensão. Estes níveis, na maior parte dos casos, para a fase fluente, estão entre 90% e 110% da tensão nominal, conforme definido no documento Procedimentos de Rede do ONS sub-módulo 23.3.

<sup>8</sup> Rejeição de carga é um termo adotado pelos técnicos da área de Sistemas de Potência para definir uma situação na qual dispositivos de proteção do sistema atuam efetuando cortes de carga do sistema.

### 2.7.5 Incerteza de Carga após o blecaute

O montante de carga que pode ser conectado ao sistema após um blecaute está sob a influência de uma série de fatores, como por exemplo:

Sazonalidade;

Região geográfica do sistema;

Período de carga em que ocorreu o desligamento e re-energização do sistema;

Duração do blecaute.

Como é difícil prever, com margem de segurança suficiente, a quantidade de carga que estará conectada ao sistema, adota-se para a fase fluente a definição de cargas prioritárias que são definidas a partir da capacidade da geração e limitação da configuração da rede de transmissão com fator de potência indutivo na faixa de 0,85 a 0,95. Isto está dentro das premissas da fase fluente onde o aspecto segurança se sobrepõe à quantidade de carga atendida.

### 2.7.6 O Controle de Freqüência na fase inicial da recomposição

No estado restaurativo pode haver violações de freqüência e tensão no sistema, o desbalanço entre geração e carga pode causar sub ou sobre-freqüência e provocar atuação do sistema de proteção (ALMEIDA et al., 1995).

Na fase fluente a freqüência deve ficar o mais próximo possível da freqüência nominal de 60 Hz, porém são admitidas variações entre 58 a 62 Hz. Para atender estes valores as IOs contemplam os seguintes requisitos:

Definição da usina da área de auto-restabelecimento que fará o controle de freqüência e caso haja mais de uma usina na área apenas, uma delas assume o controle de freqüência do sistema;

As tomadas de carga devem ser lentas e graduais (GCOI, 1998);

As usinas responsáveis pelo controle de freqüência são retiradas do Controle Automático de Geração (CAG)<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> O Controle Automático de Geração (CAG) é uma função utilizada por centros de operação de sistemas para o controle fino de freqüência e dos intercâmbios através do ajuste da potência ativa produzida pelos geradores participantes do CAG.

Com a tomada de carga prioritária sendo feita de forma lenta e gradual, mantém-se a frequência nos limites definidos para a fase fluente.

### **2.7.7 Manobras de Equipamentos**

Como em KEARSLEY (1987) e MARIANI et al. (1984), a recomposição na fase fluente adotada no Brasil tem como premissa que na ocorrência de perda de tensão em todo o circuito, como ocorre em um blecaute, todos os disjuntores em uma subestação devem ser abertos. Isto é feito com o objetivo de se ter maior controle sobre o processo de recomposição. Apesar de que, por um lado, esta medida tem como custo a energia e o tempo empregado para a execução dos controles destas aberturas, por outro lado, ganha-se no fator segurança e controle do processo restaurativo.

### **2.7.8 Fatores Associados à Operação do Sistema de Transmissão**

O papel desempenhado pelo operador de subestações de transmissão é crucial na recomposição do sistema, exigindo o processamento de grande quantidade de informações. Durante um blecaute, os operadores ficam sujeitos a forte pressão para a realização de seu trabalho com precisão em curto espaço de tempo.

A operação da transmissão durante a recomposição é muito mais complexa do que as atividades rotineiras da operação em condições normais do sistema. Muitos equipamentos são configurados e projetados para a operação do sistema no estado normal, e no estado extremo estes sistemas mostram-se inadequados.

A inadequação dos sistemas SCADA, identificada por ADIBI et al. (1987b) nos desligamentos ocorridos nos EUA, pode ter sido o elemento motivador para GOMES et al. (2002) recomendarem a modernização dos centros de controle brasileiros como medida cautelar para aumentar a segurança do sistema.

No momento de um distúrbio as atividades mais comuns da operação de subestações de sistemas de transmissão são:

Identificação da extensão do distúrbio avaliado pela informação dos estados dos equipamentos (ADIBI et al., 1992);

Processamento de grande quantidade de alarmes para a definição de qual proteção atuou e possíveis conseqüências para os equipamentos (ADIBI et al., 1992);



Processamento das informações com o enquadramento destas informações dentro das definições das IOs;

Decisão de ações a serem tomadas conforme definido pelas IOs;

Preparação da unidade para início da recomposição;

Verificação da adequação do sistema de transmissão para início da recomposição;

Realização das operações de recomposição, na seqüência correta, conforme estabelecido pelas IOs.

Apesar dos operadores terem disponíveis as instruções sobre a forma de recompor, e realizar as supervisões necessárias, etc., alguns fatores podem dificultar a operação durante um blecaute. Alguns fatores importantes são:

Operação indevida da proteção (ALMEIDA et al., 1995). Isto impede a seqüência normal além de atrasar o processo da recomposição;

Informações limitadas ou ausentes ao operador devido a indisponibilidade do sistema de comunicação ou porque o equipamento danificado não é monitorado pelo sistema SCADA;

Quantidade excessiva de alarmes ou que não estão relacionados diretamente com o distúrbio;

Os sistemas SCADA e as funções avançadas não foram projetados e/ou não foram configurados para o estado extremo e restaurativo (ADIBI et al., 1994a);

As funções avançadas, como estimador de estado, no momento de um blecaute, podem ficar indisponíveis (KOSTIC, 1997), o que prejudica a supervisão da qualidade do dado aquirida pelo sistema SCADA;

As tarefas executadas pelos operadores em um blecaute são mais complexas que as rotineiras e como os blecautes não acontecem com freqüência, as ações a serem tomadas em um blecaute podem cair no esquecimento;

A adoção do telecontrole pelas empresas de transmissão concentrou em um centro de operação várias subestações. Assim, durante um blecaute a equipe de operação tem que recompor mais de uma subestação ao mesmo tempo;

Congestionamento na comunicação entre a operação das instalações e os centros de controle hierarquicamente superiores (GOMES et al., 2002).

Observa-se que no caso brasileiro a preparação do plano de recomposição, estudos associados, hierarquia operacional, definições de usinas e áreas de auto-restabelecimento, apresentados neste capítulo, são bem definidos e já estão bem fundamentados pelos agentes do setor elétrico.

Apesar do operador de subestações desempenhar papel fundamental para a recomposição do sistema, os recursos disponíveis a ele naquele momento tão crítico, muitas vezes, não atendem às necessidades específicas para a recomposição.

## 2.8 Conclusões

A recomposição de sistemas de potência é um assunto complexo que envolve várias áreas de conhecimento e, a medida que crescem os sistemas, também crescem as particularidades que devem ser consideradas durante sua recomposição, já que muitas limitações são impostas por características próprias de cada equipamento.

A filosofia de recomposição adotada no Brasil é baseada na elaboração de um plano de recomposição com a produção de instruções de operação. Estas instruções são baseadas em estudos preliminares que seguem critérios de estabilidade e segurança do sistema e equipamentos. Ao restaurar o sistema, o operador deve seguir as diretrizes definidas por estas IOs para que o sistema possa ser recomposto com certo grau de segurança e controle sobre as fases em que se processa.

A operação do sistema em condições normais vem sendo suprida por sistemas e funções avançadas que atendem às necessidades operacionais, porém em situação de distúrbios, como em um blecaute, os recursos tradicionais dos sistemas SCADA, utilizado pelos operadores de subestações, mostram-se insuficientes para que o operador possa identificar dados de forma rápida e precisa que lhe permitam decidir pelas ações a serem tomadas conforme é definido nas IOs.

Os operadores, durante um blecaute, ficam diante de um problema complexo cuja solução depende da realização de um conjunto de ações que não lhe são rotineiras. Estas ações estão descritas em manuais, que o operador pode desejar consultar, mas isto requer muito tempo, prejudicando a agilização da recomposição. Assim, a rapidez da recomposição do sistema fica dependendo quase que exclusivamente do conhecimento do operador e sua capacidade de percepção adquiridos durante longos anos de experiência.

Como a tendência das empresas de transmissão é de concentrar em um centro de operação mais de uma subestação que são operadas por telecontrole através de sistemas SCADA, isto faz com que haja um aumento das informações que o operador deverá processar para operar o sistema.

Uma das ferramentas que vem sendo empregada para auxiliar o operador nas tomadas de decisão com o intuito de reduzir os erros operacionais e agilizar a recomposição são os Sistemas Especialistas. Esta técnica de Inteligência Artificial possui características de processamento de informações semelhantes ao raciocínio do ser humano para a busca da solução de um problema, e tem apresentado vantagens quando aspectos combinatoriais, múltiplas restrições e critérios dificultam o uso de métodos clássicos de otimização.

No capítulo seguinte são mostradas as diferentes abordagens para o uso de SE, assim como suas características e limitações.

## **3 Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas à Recomposição de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**

### **3.1 Introdução**

A tecnologia de Inteligência Artificial vem sendo empregada para o tratamento de vários problemas de sistemas de potência, como: processamento inteligente de alarmes, diagnóstico de faltas, recomposição, previsão de carga, planejamento da expansão do sistema, etc. Para isto, são utilizadas diversas técnicas de IA, entre elas: Sistemas Especialistas, raciocínio baseado em casos, lógica nebulosa (*fuzzy*), redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e sistemas Multiagentes. As características de cada uma destas técnicas permitem aos pesquisadores representarem o conhecimento dentro da área de domínio de interesse.

Uma das ferramentas que mais vem sendo empregada para auxiliar o operador na recomposição de sistemas de transmissão são os Sistemas Especialistas (SE). A preferência aos Sistemas Especialistas deve-se à sua popularização e às facilidades de representação do conhecimento que são encontradas nas plataformas de desenvolvimento de SE.

Aqui são citadas relevantes publicações sobre o tema da recomposição, sem a pretensão de abranger todo o universo, que é amplo e volumoso. Estas publicações não se restringem apenas às técnicas convencionais com estudos analíticos que usam recursos de ferramentas de processamento numérico, incluem também as que usam técnicas de IA para a solução do problema de recomposição de sistemas de potência.

Neste capítulo, procura-se classificar os trabalhos em categorias. Alguns trabalhos poderiam ser classificados em mais de uma das categorias aqui descritas, porém o objetivo que norteou esta classificação foi meramente uma forma de apresentação de modo que permitisse ressaltar determinado contexto do trabalho.

Na descrição de alguns dos artigos procura-se fazer um paralelo com a realidade brasileira e a sua atual filosofia de recomposição com foco na operação de sistemas de transmissão.

No item 3.2, é feita uma breve apresentação de IA com destaque aos sistemas especialistas baseados em regras, onde procura-se apresentar as principais características desta ferramenta de representação e processamento do conhecimento heurístico. Em seguida - item 3.3 - são apresentadas várias técnicas de IA utilizadas na recomposição de sistemas de potência e uma breve apresentação do que é encontrado em termos de artigos publicados sobre a aplicação de SE na recomposição. Algumas destas publicações também são apresentadas no item 3.4, onde os artigos foram classificados conforme sua aplicação procurando-se fazer um paralelo com o sistema brasileiro. Por sua vez, no item 3.5, é traçado um paralelo entre as características peculiares de um SE e as de operação de sistemas de transmissão durante um blecaute. Por fim, as conclusões, no item 3.6, mostram que o emprego de programas analíticos de fluxo de potência e transitórios são indispensáveis quando se trata de sistema de transmissão. Entretanto, tarefas que envolvem o raciocínio lógico, conhecimento heurístico e julgamento empírico, como é o caso da recomposição de sistemas elétricos, são melhor resolvidas com o emprego de SE.

### **3.2 Considerações Iniciais sobre Inteligência Artificial**

A IA surgiu na década de cinquenta e até hoje não existe uma definição precisa que seja aceita de forma irrestrita. BITTENCOURT (1998), na página 51, cita algumas das definições que podemos encontrar para IA:

- “uma máquina é inteligente se ela é capaz de solucionar uma classe de problemas que requerem inteligência para serem solucionados por seres humanos” (McCarthy e Hayes);
- “Inteligência Artificial é a parte da ciência da computação que compreende o projeto de sistemas computacionais que exibam características associadas, quando presentes no comportamento humano, à inteligência” (Barr e Feigenbaum);
- “Inteligência Artificial é o estudo das faculdades mentais através do uso de modelos computacionais” (Charniak e McDermott).

SRIRAM (1997), na página 1, por sua vez, diz ser a Inteligência Artificial aquilo “que se preocupa com o desenvolvimento de programas de computador que emulam a inteligência humana”

Na área de pesquisa de IA, é possível identificar duas correntes principais, a conexionista e a simbólica. A conexionista preocupa-se com a modelagem de estruturas do cérebro e suas conexões, também conhecida como redes neurais ou neuronais. A simbólica baseia-se na lógica e tem sua maior consolidação através do SE, que segundo WU e MONTICELLI (1988) “são programas de computador que consistem de uma coleção de fatos, regras, regras práticas e outros conhecimentos de uma determinada área acoplados com métodos de aplicação destas regras para fazer inferências”.

Sistemas Especialistas, Sistemas Baseados no Conhecimento e Sistemas Especialistas Baseados em Regras, freqüentemente usados como sinônimos, é um ramo da IA que se preocupa em resolver problemas usando o conhecimento especializado de um ser humano.

Portanto, SE é a técnica de IA que procura representar em programas de computador o comportamento de um especialista humano na busca da solução de um determinado problema, do qual, o especialista tem conhecimento e domínio.

Segundo BITTENCOURT (1998) capítulo 5, o SE possui uma arquitetura simples composta por três módulos: a Base de Regras, a Base de Fatos ou Memória de Trabalho e o Motor de Inferência. A base de regras e de fatos ou memória de trabalho formam a Base de Conhecimento onde estão armazenados os conhecimentos do especialista e as informações (fatos) para a solução de um problema de uma determinada área de domínio.

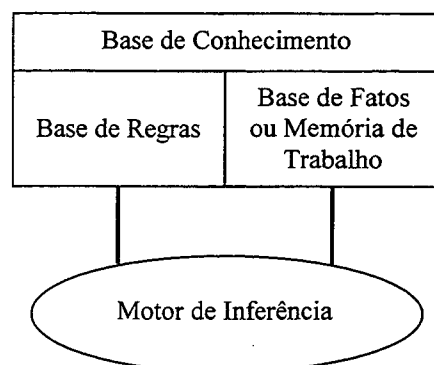


Fig. 3.1 Arquitetura de um Sistema Especialista

Na base de regras é representado o conhecimento organizado sob a forma de premissa/conclusão ou situação/ação. As regras são estruturadas na forma SE-ENTÃO, do termo da língua inglesa IF-THEN. Do lado esquerdo da regra (*Left Hand Side - LHS*), parte que corresponde ao IF, ficam as condições e no lado direito da regra (*Right Hand Side - RHS*), parte que corresponde ao THEN, ficam as conclusões e/ou ações a serem tomadas.

A base de fatos ou memória de trabalho consiste de um conjunto de fatos ou uma base de dados que são usados pelas regras. Por fim, o motor de inferência é que decide como, quando e em que ordem aplicar o conhecimento na busca da solução do problema. O motor de inferência verifica quais regras têm suas condições satisfeitas pelos fatos, prioriza estas regras e as executa de acordo com um método de resolução de conflitos pré-definido.

Os métodos de inferência também são descritos na literatura como modos de raciocínio. Os métodos de inferência mais comuns são o encadeamento para frente ou progressivo e o encadeamento para trás ou regressivo.

No encadeamento para frente, também conhecido como direcionado por dados, as regras são associadas aos dados da base de fatos, e aquelas que satisfazem as premissas são selecionadas para serem executadas; assim parte-se dos fatos conhecidos e busca-se a solução do problema. Já no encadeamento para trás, também conhecido por direcionado por metas, a partir da formulação de uma hipótese buscam-se as regras que sustentam esta hipótese, com o objetivo de provar que a hipótese ou meta é verdadeira.

Atualmente, com a popularização dos SEs, é possível construí-los a partir de plataformas de desenvolvimento conhecidos como *shell* ou Arcabouços de Sistemas Especialistas como descreve BITTENCOURT (1998), página 255. Estas plataformas de desenvolvimento são constituídas das funcionalidades necessárias de um SE, exceto do conhecimento especializado que deverá ser adquirido junto ao especialista e representado através das regras e alguma forma para representar os fatos para completar o SE.

### **3.3 Aplicações de Inteligência Artificial na Área de Recomposição de Sistemas de Potência**

A Inteligência Artificial tem sido empregada para tratar vários problemas de Sistemas de Potência. Dentre as várias técnicas, a de Sistemas Especialistas é a mais

utilizada. HUNEAULT et al. (1994) selecionou 18 áreas de Sistemas de Potência em que os SEs são aplicados, entre elas a de recomposição de sistemas.

No artigo de FALCÃO et al. (1998) encontram-se as atividades de pesquisa e desenvolvimento de IA aplicadas a Sistemas de Potência feitas no Brasil naquele ano. Identificam-se várias técnicas de IA que são aplicadas a uma variedade de problemas, muitas vezes o mesmo problema é tratado aplicando-se diferentes técnicas de IA. Por exemplo, para recomposição de sistemas, a técnica de IA largamente utilizada é o SE, no entanto outras técnicas têm sido propostas e empregadas na recomposição, como algoritmos genéticos, lógica nebulosa e sistemas Multiagentes.

SCARAMUTTI (1999) propõe a aplicação de algoritmos genéticos para a recomposição de redes radiais em sistemas de distribuição.

LEE et al. (1998) aplicam lógica nebulosa em um sistema de distribuição de energia elétrica com o objetivo de selecionar a estratégia mais adequada para a recomposição. Aqui, a preocupação é a minimização do número de chaveamentos e o carregamento dos alimentadores, preocupações características de sistemas de distribuição.

A utilização de sistemas Multiagentes proposta por COSTA (1997) mostra ser esta técnica de IA adequada à recomposição, em que as várias unidades de operação que compõem o sistema, sejam elas de usinas ou subestações de transmissão, são unidades inteligentes que podem interagir para a solução do problema. Cabe lembrar que recursos disponíveis na operação do sistema, como os sistemas SCADA, podem ser explorados em conjunto com esta técnica, ficando o sistema Multiagentes responsável pela manipulação e processamento inteligente das informações disponibilizadas pelo sistema SCADA. NAGATA e SASAKI (2001) também propõem a utilização de sistemas Multiagentes na busca de uma rota de energização para sistemas radiais.

As características de cada uma destas técnicas permitem aos pesquisadores representarem o conhecimento e validarem esta representação dentro da área de domínio de interesse.

No caso da recomposição de sistemas de transmissão que é um problema combinatorial, de otimização, de múltiplos objetivos, de múltiplos estágios, com restrições de igualdade e desigualdade e não linear (SHAIDPOUR e KIRSCHEN., 1992) (WU e MONTICELLI, 1988) (NADIRA et al., 1992), os métodos clássicos de otimização não conseguem modelar o problema de forma satisfatória e os métodos heurísticos são melhor



aplicados (SAKAGUCHI e MATSUMOTO, 1983). Assim, os recursos de IA, em especial os SÉS, apresentam-se como ferramenta adequada para a busca da solução deste tipo de problema.

Apesar de várias técnicas de IA serem aplicadas à recomposição, a preferência recai sobre os SEs. Isto pode ser devido à sua melhor adequação para representar o conhecimento da recomposição, pela sua popularização, ou porque, como declaram BALU et al. (1992), “os Sistemas Especialistas surgiram como resultado natural das necessidades dos operadores, planejadores e pesquisadores por melhores métodos de solução de seus problemas”.

A publicação de SAKAGUCHI e MATSUMOTO (1983) é considerada pioneira em utilizar Sistemas Especialistas para a recomposição de sistema de potência. Eles declaram que o conjunto de soluções do controle restaurativo não é regido somente por leis físicas, mas também por leis "artificiais". Estas leis artificiais são os procedimentos operacionais usados pelas equipes de operação do sistema. Também entendem que estas leis possuem características combinatoriais que impedem que elas sejam modeladas através de ferramentas analíticas. Após esta publicação, abriram-se novos horizontes para a solução do complexo problema de recomposição de sistemas de potência surgindo uma série de publicações sobre o tema.

Muitos destes artigos encontram-se no livro editado por ADIBI et al. (2000). Trata-se de um compêndio de 87 artigos publicados pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) que fazem referência à Recomposição de Sistemas de Potência. Neste livro encontram-se os trabalhos feitos pela “força tarefa” constituída em 1978, hoje *Power System Restoration Working Group* (PSR-WG). Os treze artigos que formam o primeiro dos sete capítulos do livro, trazem uma visão geral de Recomposição de Sistemas de Potência, problemas e restrições que devem ser considerados no processo de recomposição.

No capítulo II, é apresentado um conjunto de artigos que tratam de técnicas usadas para verificação de diferentes aspectos da recomposição de sistemas de potência. Alguns artigos deste capítulo não são diretamente aplicáveis ao sistema elétrico brasileiro, uma vez que são voltados para um parque gerador com base térmica, com as cargas localizadas próximas da geração, oposto ao brasileiro, que é formado de geração basicamente hidráulica com as cargas localizadas longe da geração.

Os artigos sobre planos de recomposição em sistemas de potência estão agrupados no capítulo III, descrevendo estratégias, uso de recursos computacionais e processos utilizados para uma recomposição planejada.

Os artigos que tratam de ferramentas utilizadas para o treinamento de operadores em recomposição encontram-se no capítulo IV, cuja motivação é permitir ao operador de um centro de operação simular ou experimentar condições de falta para que quando estas ocorrerem, ele possa recompor o sistema já conhecendo o fato. O artigo 4.08, *Verification of an Advanced Power System Restoration Support System Using an Operator Training Simulator* (KOBAYASHI et al., 1994), propõe um sistema de apoio à recomposição, em que os testes e validação são realizados com o uso de um OTS.

O capítulo V traz um conjunto de textos que relatam os procedimentos que cada uma das empresas citadas nos artigos adota para a recomposição dos seus sistemas. A filosofia adotada por cada uma destas empresas leva em conta as características próprias de seus sistemas que, associadas ao conhecimento heurístico, formado pela experiência do especialista e as ferramentas analíticas, conduzem a definições de planos de recomposição que melhor se adaptam a cada caso.

A Recomposição de Sistemas de Potência usando os recursos de Sistemas Especialistas estão agrupados no capítulo VI. É um conjunto de 15 artigos, incluindo o pioneiro artigo de SAKAGUSHI e MATSUMOTO (1983) que serviu de referência para uma seqüência de artigos com aplicação de sistemas especialistas para recomposição de sistemas elétricos de potência.

Por fim, no capítulo VII estão os artigos relacionados à recomposição de sistemas de distribuição de energia elétrica, nestes os algoritmos numéricos são integrados ao sistema especialista para a determinação da recomposição do sistema de potência.

SHAH e SHAHIDEHPOUR (1989) descrevem como vantajoso o uso de SE na recomposição de sistemas comparado aos programas com algoritmos convencionais, já que estes têm que examinar os dados exaustivamente consumindo muito tempo computacional, enquanto que o SE considera apenas as regras aplicáveis, limitando o uso do computador e obtendo-se maior eficiência.

Devido às suas características o SE passou a ser considerado uma ferramenta de solução de problemas de engenharia que apresentam dificuldades de modelagem e tratamento por programas que utilizam métodos analíticos com formulação numérica.

A seguir é apresentado um conjunto de abordagens que empregam Sistemas Especialistas para a recomposição de Sistemas de Potência.

### **3.4 Revisão Bibliográfica sobre o uso de Sistemas Especialistas na Recomposição de Sistemas de Transmissão**

Muitos dos artigos sobre recomposição de sistemas de potência giram em torno de conceitos, filosofias adotadas e experiências vividas pelas empresas durante um blecaute. Isto permite que surjam sugestões, definição de tipos de estudos e de procedimentos que devem ser observados durante a recomposição. Um exemplo disto pode ser encontrado em ADIBI et al.(1987a) e ADIBI et al.(1987b), que são dois artigos feitos pela força tarefa do IEEE .

Após a publicação de SAKAGUSHI e MATSUMOTO (1983), surgiram um grande número de publicações sobre SEs aplicados à solução de diversos problemas, por exemplo: recomposição de sistemas de transmissão ou distribuição em tempo real, planejamento da recomposição, e ainda, para o treinamento de operadores.

A literatura é vasta e abrangente, tratando o problema da recomposição desde uma visão genérica e sistêmica, englobando geração, transmissão e distribuição, até assuntos específicos como a definição de topologia de rede elétrica e seqüência de chaveamentos.

É evidente que em uma literatura tão abrangente é necessário estabelecer alguns critérios para a apresentação das abordagens. Neste trabalho, procura-se classificar os trabalhos dentro das seguintes categorias:

- Categoria Conceitual de Aplicação de Sistemas Especialistas;
- Categoria da Utilização de Sistemas Especialistas na Operação em Tempo Real;
- Categoria de Considerações a Respeito das Características dos Sistemas Especialistas;
- Categoria de Alternativas de Uso de SE para Sistemas Específicos.

Como o objeto deste trabalho é a recomposição de sistemas de transmissão na fase fluente, conforme filosofia adotada no Brasil, procura-se traçar um paralelo entre esta filosofia e as abordagens feitas pelo diversos autores.

Cabe salientar que características do sistema de potência como a topologia da rede, nível de tensão e potência envolvida são consideradas de formas diversas pelos autores e

implicam adoção de métodos, estudos e requisitos diferentes. Determinados sistemas ou a abrangência do estudo, exigem maiores recursos de análise da rede do que outros. Para sistemas radiais e em anel os critérios para fechamento de disjuntores são diferentes, no radial não há preocupação com a tensão e o ângulo nos terminais do disjuntor, porém, no sistema em anel a diferença de ângulo deve ser considerada para não submeter os rotores das máquinas a variações de torque que possam provocar perda de vida útil ou danificá-las. Também, no caso de anéis constituídos por linhas de transmissão de tensão diferentes, o nível de tensão em que será fechado o anel pode ter restrições impostas pela característica do sistema ou dos equipamentos que compõem a rede.

No capítulo 2, deste trabalho, foi descrito um conjunto de critérios que devem ser considerados ao recompor sistemas de transmissão, bem como as restrições que devem ser atendidas.

A seguir são apresentados os trabalhos nas categorias citadas anteriormente.

### **3.4.1 Categoria Conceitual de aplicação de Sistemas Especialistas**

Nesta categoria estão classificados artigos que discutem os problemas de recomposição e sugerem os SEs como ferramentas de solução deste problema. Os artigos discutem problemas, sugerem filosofias, mas não implementam nenhuma ferramenta computacional, restringindo-se aos aspectos conceituais.

WU e MONTICELLI (1988) propõem a arquitetura de um sistema para a recomposição de sistemas. O sistema é baseado em ferramentas analíticas que são integradas ao EMS através do qual o operador faz as ações de intervenção no sistema de potência. Estas ferramentas são integradas à operação de sistemas nos níveis de estudos preliminares, treinamento de operadores e em ambiente de tempo real.

A ferramenta proposta é montada sobre três tarefas denominadas de: modelagem, análise e otimização e a de síntese. As duas primeiras são apoiadas pelos algoritmos numéricos de fluxo de potência, enquanto que a última, usa um SE que contém o conhecimento adquirido pelos operadores, por exemplo, a definição de seqüências de chaveamento e de tomada de carga.

Os autores deste artigo, propõem também o uso do conceito do quadro negro, na língua inglesa “blackboard”, onde as informações armazenadas são compartilhadas entre os vários módulos que compõem o sistema. Como a recomposição de sistemas é um

problema de múltiplos estágios e múltiplos objetivos, as informações podem ser compartilhadas por vários programas que executam tarefas específicas de análise. Como exemplificado no artigo, em determinado estágio da recomposição uma tarefa define uma região da rede a ser energizada, esta informação é armazenada no quadro negro e será utilizada por outra tarefa, como a definição de seqüência ótima de recomposição, e uma tarefa será executada para verificar as violações a partir das informações contidas no quadro negro.

Apesar de se tratar de um projeto conceitual, observa-se a preocupação dos autores com a seleção de seqüências de manobras e com os procedimentos para a análise dos planos e a proposta de um SE para a execução destas tarefas. Como o trabalho é teórico não há informações de como seriam feitas as análises de transitórios, caso se desejasse utilizar a ferramenta em sistemas de transmissão. Sabe-se que estas análises podem implicar tempo computacional elevado para se chegar a uma conclusão quando o número de casos a serem verificados e analisados é grande.

Sob o ponto de vista da filosofia adotada no Brasil que divide a recomposição nas fases fluente e coordenada e é baseada em estudos preliminares, o modelo conceitual apresentado poderia ser aplicado para a elaboração destes estudos.

Outro trabalho aqui categorizado é o de ADIBI et al. (1994b) que divide em três fases a recomposição do sistema. A primeira fase é caracterizada pela definição das fontes iniciais de geração, na qual a função básica do SE é mostrar ao operador quais áreas geo-elétricas são passíveis de recomposição. Na segunda fase, o objetivo principal é a interconexão das várias áreas geo-elétricas. São atribuídas ao SE várias funções nesta etapa, tais como o estabelecimento das rotas de energização, associado à execução de programas analíticos permitindo verificar se alguma restrição, por exemplo: limite de carregamento em linhas de transmissão, seria violado. Na terceira fase é feito o atendimento das cargas ainda não supridas, e o SE deve desempenhar um papel de coordenação, maximizando a geração e coordenando a entrada dos geradores com a tomada de carga de áreas geo-elétricas diferentes, além de manter adequada reserva de geração.

O sistema de potência a que os autores se referem é um sistema com base de geração em unidades térmicas, diferenciando-se do brasileiro, no qual a base é hidráulica. Além disso, suas recomendações são para um sistema onde toda a supervisão e controle

está concentrada em um único centro de controle. As recomendações têm um caracter bem abrangente e estão baseadas no ponto de vista das necessidades e tarefas operacionais que são executadas durante a recomposição. Os autores conseguiram mostrar a complexa tarefa da recomposição, atribuindo ao SE funções como a de auxílio à decisão, gerenciamento de tarefas, elaboração de IOs “on-line” e interpretação de resultados dos programas analíticos.

Traçando um paralelo com o modelo brasileiro, pode-se perceber que algumas tarefas que os autores atribuem ao SE estão contempladas nos estudos preliminares que dão origem às IOs. No caso brasileiro e baseado nas proposições dos autores, pode-se pensar na utilização de um SE também durante as fases de estudos preliminares, auxiliando o especialista na elaboração das IOs. Durante a recomposição fluente o SE daria suporte aos operadores das unidades e na fase coordenada poderia sugerir ações a partir de uma demanda feita pelo operador de subestação na busca de uma solução que possa não estar contemplada nas IOs.

FINK et al. (1995) propõem uma metodologia conceitual para o desenvolvimento de um SE visando a construção de estratégias de recomposição que possam ser utilizadas por várias empresas. Desta forma procuram identificar características comuns no processo restaurativo de várias empresas, porém declaram que a generalização não é uma tarefa fácil já que cada empresa possui sua estratégia de recomposição que é voltada às características próprias do seu sistema. O problema foi contornado definindo as condições finais que o sistema deve atender após a recomposição e não a partir das condições iniciais do sistema.

A proposta dos autores é importante na análise da construção dos planos de recomposição, porém não traz detalhes de como é garantida a não violação de restrições que serão verificadas através de programas de simulação numérica. Apesar dos esforços de generalização é sabido que características individuais das redes elétricas são indispensáveis para os estudos e simulações, e que, por vezes, são responsáveis pela definição do processo de recomposição de modo que as restrições não sejam violadas.

KIRSCHEN e VOLKMANN (1991) consideram que a recomposição pode ser decomposta em um conjunto de objetivos que permitem a identificação dos níveis “estratégico” e “tático”. No nível estratégico o SE sugere ao operador o objetivo mais urgente e os diferentes caminhos possíveis para atingir este objetivo. Já no nível tático o SE prepara um plano detalhado de recomposição que, após ser revisado pelo operador, fará os controles necessários segundo este plano. Caso algum destes controles não obtenha o

resultado esperado, o sistema notificará e fará sugestões alternativas ao operador. Apesar das simplificações, como a ausência de estudos transitórios a partir de ferramentas analíticas, os autores mostram a capacidade dos SE apresentarem rotas de energização com a topologia da rede sendo representada com uma descrição hierárquica das subestações.

No caso brasileiro as rotas de energização da fase fluente são definidas pelos estudos preliminares. Estas rotas, a seleção das usinas de auto-restabelecimento e das cargas prioritárias definem o que se chama de áreas de auto-restabelecimento.

### **3.4.2 Categoria da Utilização de Sistemas Especialistas na Operação em Tempo Real**

Nesta categoria foram classificados os trabalhos nos quais os autores recomendam o uso de SE em tempo real para auxílio ao operador durante a recomposição de sistemas de potência.

A operação em tempo real do sistema muitas vezes recorre à experiência de um especialista para resolver problemas que acontecem durante a recomposição. Muitos destes especialistas são operadores com larga experiência, outros são especialistas que trabalham na área de estudos de sistemas de potência e utilizam os recursos computacionais de análise de redes para tomarem as decisões. Diante disto, muitas publicações seguiram o caminho da proposta de uso de SEs que fossem disponíveis ao operador em tempo real e que fossem capazes de fornecer as mesmas respostas que os especialistas humanos diante da mesma situação.

A maioria dos problemas encontrados durante a recomposição é decorrente de condições não previstas em planos elaborados com estudos preliminares, e que poderiam ser resolvidos se os planos de recomposição fossem montados no momento da falta. Muitos autores passaram a tratar o assunto dentro desta perspectiva, adotando diversos modelos de estratégias de recomposição, como é apresentado a seguir neste trabalho. Independente da estratégia, podemos apontar algumas características que correspondem a este tipo de enfoque:

- O plano de recomposição é montado no momento da falta ou blecaute;
- O SE deve estar integrado ao sistema SCADA ou EMS para poder reconhecer o atual estado da rede;

- O SE para montar este plano deve conter o conhecimento do especialista, estar integrado a programas analíticos de formulação numérica e deve ser capaz de interpretar as informações resultantes destes programas;
- O uso deste sistema é indicado para centros de operação que possuem visão completa e integral do sistema, incluindo geração, transmissão e distribuição, portanto em um centro de nível hierárquico superior, para recomposição feita de modo centralizado.

Algumas destas características poderiam adaptar-se ao modelo brasileiro, como a de montar o plano de recomposição no momento da falta a partir do conhecimento de especialistas e do resultado de análises de programas numéricos, que são utilizados na elaboração das IOs; outras, como a centralização das operações de recomposição, não atendem à filosofia de recomposição na fase fluente adotada no Brasil.

O trabalho de SAKAGUSHI e MATSUMOTO (1983) mostra a capacidade de representação do conhecimento dos SEs e sua potencial aplicação como ferramenta de apoio nos estados operacionais restaurativo e extremo. Os autores simplificam o problema desconsiderando dificuldades que surgem durante a recomposição, como as sobretensões. O sucesso deste trabalho abriu caminho para outras publicações, como as de KOJIMA et al. (1989a e 1989b), nas quais os autores descrevem um método para criação de um plano de recomposição combinando programas analíticos com um SE que contém o conhecimento heurístico dos operadores. O método proposto visa a produção de um plano de recomposição no momento da falta, buscando assim superar possíveis impedimentos que não estão contemplados em estudos preliminares. Quando isto ocorre o operador pode modificar um plano gerado anteriormente devendo para isto iniciar a busca por um novo plano. Contudo, as simplificações usadas pelos autores, tanto no dimensionamento do sistema quanto a ausência de estudos de transitórios eletromagnéticos, não são possíveis na prática para sistemas de transmissão.

O trabalho de HOTTA et al. (1990) é voltado para um sistema de distribuição e o SE proposto apresenta uma interessante estrutura. A base de conhecimento é dividida em três bases individuais: a de identificação da falta, a de elaboração do plano de recomposição e a de auxílio à operação. Segundo os autores, esta divisão proporcionou ganhos de velocidade de execução e facilidades na manutenção das bases de conhecimento. Este trabalho aborda também preocupações da integração do SE com o



SCADA, bem como a superação das dificuldades que são encontradas quando a recomposição é baseada em planos definidos com estudos preliminares.

### **3.4.3 Categoria de Considerações a Respeito das Características dos Sistemas Especialistas**

Nesta categoria foram classificadas as publicações que recomendam características que devem ser consideradas quando se faz o uso de SE na recomposição

Preocupados com o aumento da competição e das exigências impostas aos técnicos da área de engenharia de sistemas de potência, e reconhecendo as potencialidades dos SEs, BALU et al. (1992) citam uma série de ferramentas de auxílio ao operador que vêm sendo desenvolvidas no Electric Power Research Institute (EPRI) nos Estados Unidos, entre as quais, uma para recomposição de sistemas de potência. Os autores entendem que o objetivo da ferramenta aplicada à recomposição de sistema, é proporcionar ao operador recomendações de controle no momento da recomposição. O operador deve estar seguro de que estas recomendações estão de acordo com as de um especialista desta área e que foram minuciosamente verificadas para que não haja violações de restrições no momento de recompor o sistema. Para tanto as três condições abaixo devem ser satisfeitas ao se utilizar um SE:

- Na etapa de desenvolvimento o especialista humano deve estar disponível para fornecer o conhecimento na área de domínio;
- O SE deve ser rápido e confiável em suas respostas;
- O SE deve ser capaz de fornecer explicações e justificar as suas respostas.

Recomendam ainda que a introdução ao uso de SEs deve ser lenta, para que o desenvolvedor e o usuário sintam-se confortáveis com a ferramenta.

As potencialidades das tecnologias de IA, proporcionam um avanço em áreas como a de recomposição de sistemas de potência, e isto levou um grupo de trabalho formado no âmbito do IEEE a fazer algumas sugestões que, no entender dos autores, devem ser consideradas quando se utiliza SEs para recomposição de sistemas de potência. Estas sugestões encontram-se no artigo de SHAHIDEPOUR e KIRSCHEN (1992). Este trabalho preocupa-se com aplicações de SEs que se aproximem ou reflitam a forma como os operadores reagem diante do problema da recomposição. Reconhecem que são muitos os aspectos que devem ser observados durante a recomposição, recomendando assim, que o

sistema seja tratado por várias ferramentas que utilizem SE, e não somente um SE capaz de resolver todos os aspectos. Os autores consideram também que ferramentas analíticas devem ser consideradas para que sejam apresentadas ao operador somente ações de controle que não causem violação de nenhuma restrição. SHAHIDEPOUR e KIRSCHEN (1992) declaram também que a complexidade do problema da recomposição impede que sejam desenvolvidos métodos gerais que abranjam um conjunto muito grande de circunstâncias operacionais com o objetivo de gerar séries de ações de controle restaurativo, é preferível, isto sim, soluções que reflitam a abordagem encontrada pelo especialista humano. Resumem as recomendações das características desejáveis de um SE para recomposição como:

- O sistema deve funcionar como um “assistente” ao operador, requerendo poucas instruções para operar, estando disponível quando requisitado, e deixando a decisão final ao operador. Isto pode ser obtido integrando o SE ao sistema SCADA, pois com isto os dados de processo são obtidos automaticamente, evitando que o operador dispense seu tempo com a entrada de dados;
- O SE deve fornecer os procedimentos fazendo com que as decisões sejam rápidas mesmo em situações extremas, contemplando diversas circunstâncias;
- As ações de controle recomendadas ao operador devem ser validadas pelos programas analíticos, garantindo a não violação de restrições;
- Integração do SE ao sistema de supervisão, buscando a redução do tempo de indisponibilidade de energia ao consumidor;
- O SE pode ser usado também para a elaboração de planos de recomposição, avaliação de estratégias e procedimentos usados para recomposição.

MATSUMOTO et al. (1992) identificam três "técnicas" para recomposição de sistemas através do uso de SE: a de auxílio operacional; a de metodologia da recomposição e a de desenvolvimento do sistema. A de auxílio operacional é centrada na interface com o usuário onde o objetivo principal é permitir ao operador tratar eventos inesperados que possam ocorrer durante uma recomposição, de modo que possa prosseguir no processo de recomposição. Na metodologia da recomposição o SE deve ser capaz de processar as estratégias e filosofias de recomposição envolvendo a energização de linhas e subestações. A de desenvolvimento do sistema consiste da aquisição do conhecimento e integração ao ambiente operacional existente, principalmente ao sistema SCADA.

Os autores também recomendam que os sistemas de recomposição devem produzir várias alternativas ao operador, para que este possa julgar, por comparação, qual é a melhor.

Cabe aqui ressaltar que a proposta é aplicável a centros de operação com visão geral do sistema elétrico. Uma das justificativas apresentadas pelos autores para o emprego desta alternativa é a de que os planos gerais de recomposição são complexos e difíceis de interpretação, especialmente no momento de uma falta no sistema quando os operadores estão sob estresse. Porém, com isso, remetem-lhes à difícil tarefa de decisão entre alternativas de recomposição que serão geradas no momento da falta.

#### **3.4.4 Categoria de Alternativas de Uso de SE para Sistemas Específicos**

Nesta categoria foram classificados os artigos que apresentam uma aplicação prática de SE em algum sistema de potência.

MONDON et al. (1992) apresentam uma ferramenta para recomposição aplicada ao sistema de distribuição da empresa Electricité De France (EDF). O SE nesta ferramenta é responsável pela elaboração do plano de recomposição no momento da falta. O plano é elaborado baseando-se no estado atual da rede, porém, possíveis informações incorretas podem promover um plano que não seja consistente. Por exemplo, caso durante a execução da recomposição seja verificada a indisponibilidade de algum equipamento ou dispositivo que deveria entrar em serviço, o plano elaborado deverá ser modificado, colocando o equipamento na condição “fora de serviço”. Isto pode ocasionar um atraso na recomposição já que a modificação no plano inicial implica a elaboração de um novo plano, exigindo tempo computacional.

Como a ferramenta descrita é para sistemas de distribuição ela não inclui análise de transitórios, sua utilização em sistemas de transmissão deve ser restrita a redes que foram simuladas previamente e que não apresentaram nenhuma violação das restrições, ou que estas restrições tenham sido embutidas nas regras, porém, neste caso, estaria limitando a elaboração de planos alternativos.

KOSTIC et al. (1998) propõem uma ferramenta de apoio à decisão, para ser usada em um centro de controle para recomposição de sistemas de transmissão nos casos de blecautes. O sistema é para uso em tempo real com interação com o operador. O sistema

inclui um módulo de simulação dinâmica onde possibilitando ao operador simular determinada ação de controle e, a partir dos resultados deste simulador, decidir sobre a efetivação do controle no sistema. O SE que compõe a ferramenta contém as regras que descrevem a estratégia de recomposição. O sistema é integrado a um simulador o que permite que ele seja validado em um ambiente fora de operação. Observa-se aqui novamente a não inclusão de análise de transitórios, mas que poderiam ser objeto de estudos preliminares e estarem também incluídos nas regras que descrevem a estratégia de recomposição.

No Brasil, os recursos de IA, em especial os Sistemas Especialistas, também têm sido utilizados na recomposição de sistemas de potência.

VALE et al. (1997) apresentam uma ferramenta de auxílio à recomposição do sistema da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), cujos objetivos são dar apoio ao operador em tempo real e treinamento de operadores. A base de regras do SE é montada a partir das IOs e a ferramenta foi desenvolvida em linguagem C.

Alguns desenvolvimentos de SEs utilizam ferramentas de desenvolvimento, *shells*, já prontos, enquanto outros optam por desenvolver um sistema próprio.

Segundo MUNDIM (1996) a opção por desenvolver um SE próprio descartando os *shells* disponíveis no mercado vem do fato destes não apresentarem uma relação custo-benefício apropriada. Já VALE et al. (1997) lembram que a opção em criar uma ferramenta própria exige o desenvolvimento de facilidades que já estão disponíveis nos pacotes de desenvolvimento prontos. O desenvolvimento do SE a partir de linguagens procedimentais (C, Fortran, Basic, etc.) exige a elaboração de “regras de inferência” VALE et al. (1999), impondo assim um controle sobre a inferência pretendida do sistema. Neste caso, pode-se adotar um método de busca específico, como proposto por MORELATO e MONTICELLI (1989), o que também pode exigir trabalho adicional para a manutenção do sistema.

MACÊDO et al. (1999) e BERNARDO (2000), por sua vez, utilizam um *shell* de desenvolvimento do SE, sendo que o segundo optou por um *shell* de domínio público.

A utilização de SEs aplicados à operação de sistemas de potência em tempo real necessita da integração dos SEs ao sistema SCADA/EMS através de um Sistema de Supervisão e Controle, tornando a tarefa de supervisão mais leve ao operador do sistema em tempo real, evitando possíveis erros na entrada de dados feita manualmente pelo operador.

O artigo de KOJIMA et al. (1989b) apresenta um protótipo de SE recomendando sua aplicação na empresa Tokyo Electric Power Company (TEPCO). No trabalho realizado pela “força tarefa” no âmbito do CIGRÉ (HEILBRONN et al., 1993), o SE da TEPCO figura como protótipo sendo operado com dados simulados. O espaço de tempo de quatro anos aqui configurado mostra a complexidade do desenvolvimento de um protótipo e sua entrada em operação.

Em geral, os protótipos que usam SE para recomposição podem estar sujeitos a uma série de fatores que podem dificultar a sua implementação na operação de sistemas. Algumas deduções para estas dificuldades são apontadas abaixo:

- Os requisitos operacionais não estavam todos contemplados no protótipo o que pode provocar uma migração lenta para a fase operacional;
- A base de conhecimento não estava completa no protótipo, e a aquisição e representação de conhecimentos complementares é uma tarefa difícil e complexa, pois os especialistas não se sentem seguros em transferir seus conhecimentos e o SE passa a ser visto como uma ameaça a seu domínio;
- O protótipo não representava a complexidade do sistema e ao promover a implementação operacional pode-se encontrar dificuldades que não permitam uma implementação de forma simples;
- Protótipos cuja abrangência seja, por exemplo, gerar o plano de recomposição no momento da falta sem estudos preliminares são muito complexos e tem implementação lenta pois exigem a integração e interpretação de resultados de programas numéricos;
- A operação em tempo real exige a integração ao SCADA/EMS e podem ser encontradas dificuldades de efetuar esta integração para uso na operação em tempo real;
- A implementação deve seguir a orientação de BALU et al. (1992) para que seja lenta e discutida, de tal sorte que os usuários sintam-se confortáveis com a nova ferramenta;
- Fatores não técnicos, como mudanças de filosofias ou mudança da estrutura da empresa ou setor elétrico, podem contribuir para o tempo de implementação.

Outras reflexões que são oriundas do conjunto de artigos publicados relacionam-se ao fato de que empresas tradicionais fornecedoras de Sistemas de Supervisão e Controle e

EMS, não apresentam SEs em seus produtos de linha . As respostas podem seguir vários caminhos dos quais podem ser citados alguns como:

- As empresas não incluem em seus produtos de linha, porque cada sistema ou empresa do setor elétrico possui particularidades e filosofias próprias que dificultam o emprego genérico de um SE.
- A dificuldade de transferir o conhecimento de um especialista de determinada área de domínio para a base de conhecimento do SE não permite que a construção da base de conhecimento fique sobre o domínio da empresa que fornece o sistema de Sistemas de Supervisão e Controle (SSC)/SEM, uma vez que o conhecimento pertence à empresa que está adquirindo este sistema;
- Não existe ainda uma padronização para os SSC visando a integração com ferramentas de desenvolvimento de SE.

Estas reflexões não têm aspecto conclusivo, isto é, são o produto da análise de um recurso de IA, os Sistemas Especialistas, como solução de um problema abrangente que é a recomposição de sistemas de potência.

### **3.5 Paralelo entre as Características Intrínsecas dos SEs e as da Operação de Sistemas de Transmissão durante uma Recomposição**

Na descrição que segue procura-se fazer um paralelo entre o que a literatura apresenta como vantagens e desvantagens dos SEs e a filosofia de recomposição adotada no Brasil, enfocando a fase fluente.

As vantagens e desvantagens apresentadas a seguir foram coletadas das publicações de BALU et al. (1992), MANDAN e BOLLINGER (1997) e GIARRATANO e RILEY (1998) e o paralelo aqui descrito procura ater-se à operação de subestações de sistemas de transmissão, ao modelo de recomposição atualmente adotado no Brasil, e às características básicas de um SE.

#### **a) Aspecto da permanência do conhecimento**

Enquanto o ser humano está limitado ao tempo, podendo aposentar-se, morrer ou estar sujeito a atividades físicas e mentais que podem levar o conhecimento ao esquecimento ou ao desuso, o SE é permanente, uma vez que o conhecimento tenha sido transferido para a base de conhecimento.

É comum as empresas de Sistemas de Potência investirem em treinamento com o objetivo de atualização e recapacitação de seus operadores para a operação do sistema, e para que, em casos de blecautes, estejam capacitados para a execução das atividades necessárias.

Mesmo com o treinamento, como grandes contingências não são freqüentes, o operador do sistema pode esquecer os procedimentos, já que as operações, no momento de uma falta, diferenciam-se das operações corriqueiras que ele está acostumado a fazer em uma condição normal do sistema. Por outro lado, no SE este conhecimento está permanente e disponível;

b) Aspecto da disponibilidade

Um sistema especialista pode ficar disponível em qualquer computador 24h por dia, 7 dias na semana, enquanto que um especialista humano poderá estar ausente no momento em que ocorre uma demanda pelo seu conhecimento. No caso da recomposição isto é crucial, já que não é possível prever quando ocorrerá uma falta e a sua proporção, e o conhecimento de como recompor o sistema deve estar disponível o mais rápido possível para que o operador possa tomar a decisão dos controles necessários a serem feitos. A consulta a manuais, nesta situação, acarreta maior tempo para a recomposição e o operador sob pressão do momento pode ter dificuldades de interpretação podendo resultar em decisões incorretas.

c) Aspecto da confiabilidade

As respostas de um SE estão limitadas às informações que estão armazenadas na base de conhecimento. As conclusões que um SE chegar serão aquelas implícitas em sua base de conhecimento, isto é, o SE não tem capacidade de generalização. Além disso, a base de conhecimento pode estar incompleta e/ou inconsistente, fazendo com que não seja possível prever o comportamento do SE quando sujeito a situações que não foram testadas.

Neste caso, pressupõe-se que as metodologias de teste e busca de erros adotadas durante a validação da ferramenta não foram suficientes para garantir a confiabilidade do SE.

O especialista humano, por sua vez, a partir de um conjunto de informações é capaz de examiná-las e extrair aquelas que se referem ao objetivo. Pode também a partir de dados sensoriais como visão, audição e olfato transformá-los em informações que são usadas na solução do problema. Porém, as respostas do especialista humano são

influenciadas por fatores emocionais e em uma situação de forte estresse, pressão ou fadiga, o humano pode deixar de processar alguma informação importante, o que não acontece com os SEs.

Sabe-se que durante um blecaute o operador de uma subestação está sob forte pressão, com uma quantidade elevada de informações para serem processadas e tendo que decidir pelos procedimentos adequados a serem executados. Neste momento o confronto de seu conhecimento com as respostas vindas de um SE permitirá que sejam tomadas decisões corretas ou evitar operações que não estão previstas nas IOs e, portanto, não recomendadas para aquele momento. Com isto, obtém-se maior grau de confiabilidade na execução dos controles restaurativos.

d) Aspecto da criatividade

A criatividade não é uma característica dos SEs, suas respostas e tratamento das informações são restritas ao que foi armazenado em sua base de conhecimento na forma dos fatos e regras ali existentes e ao mecanismo de busca utilizado.

Neste aspecto, sob o ponto de vista da recomposição na fase fluente, busca-se a observância das IOs, uma vez que estas instruções contemplam simulações e estudos preliminares que garantem uma recomposição segura sem violação das restrições.

Apesar do homem ser capaz de tratar eventos inesperados usando a imaginação para resolver problemas, a filosofia de recomposição, adotada no Brasil, remete estes casos para a fase coordenada, onde centros de operação, que ocupam posição hierarquicamente superior aos de operação de usinas e subestações, decidem como contornar estes eventos inesperados.

e) Processamento de grande quantidade de informações e rapidez de resposta

Tem sido uma tendência das empresas do sistema elétrico concentrar em um centro de controle a operação de mais de uma subestação, com isto aquela equipe de operação que no modelo convencional de operação preocupava-se exclusivamente com uma subestação, ao operar a partir de um centro, tem que agregar conhecimento de todas as subestações que estão sob seu controle.

As IOs são elaboradas para cada subestação e na maioria das vezes cada subestação tem suas particularidades mesmo quando pertencem a um mesmo nível de tensão. Portanto, é necessário que o operador tenha em mente um conjunto de informações que cresce com o



número de subestações sob seu controle, o que poderá dificultar o pleno domínio de todas as informações e particularidades necessárias.

No momento de um desligamento de grandes proporções, no modelo convencional, as várias subestações, afetadas pelo desligamento, seriam atendidas por equipes diferentes e, em princípio, simultaneamente. Já na operação por centros de operação, cada subestação será atendida de acordo com o número de operadores disponíveis para cada subestação, o que poderá levar as subestações a serem atendidas em períodos de tempo diferentes, caso o número de operadores seja menor do que as subestações controladas pelo centro. Caso o operador apresente uma resposta lenta no processamento das informações para a efetivação dos controles restaurativos pode acarretar um acúmulo de tempos, já que a recomposição de uma subestação muitas vezes depende de outra.

Um SE tendo em sua base de conhecimento o conjunto completo das informações, poderá processar um grande conjunto de informações daquele domínio e dependendo do *software e hardware* disponíveis, a resposta de um SE é mais rápida do que a de um humano, sendo uma opção recomendável para tornar mais rápida a operação em tempo real de subestações, sejam estas operadas localmente ou não.

#### f) Aprendizado e manutenção

A aptidão do humano de aprender e adaptar-se a novas condições não faz parte das características do SE. As novas informações ou modificações devem ser executadas através de manutenção na base de conhecimento do SE. Apesar dos esforços de alguns pesquisadores em incorporar habilidades de aprendizado aos SEs, estes não se aplicam com boa desenvoltura em processos nos quais o aprendizado é condição para a solução do problema. Existem algumas técnicas para aquisição de conhecimento que têm como meta a geração de regras, procurando otimizar o trabalho de aquisição do conhecimento, como por exemplo, a “aprendizagem indutiva”, apresentada por GIARRATANO e RILEY (1998) na pág. 49, cuja idéia é construir sistemas especialistas usando redes neurais artificiais.

Para a recomposição do sistema de transmissão na fase fluente, o aprendizado e manutenção está condicionado a modificações que porventura sejam feitas nas IOs, o que é perfeitamente possível de ser realizado através de modificações e inclusões na base de conhecimento.

#### g) Capacidade de explicação e justificação

Uma das características desejáveis em um SE é que ele forneça explicações e justifique o resultado. A facilidade ou não desta implementação depende do *shell* utilizado. O SE sempre estará pronto para apresentar estas explicações enquanto que o humano por razões como fadiga, pressa, etc., pode vir a não apresentá-las.

Esta característica dos SEs, também facilita sua aceitação, já que o usuário não precisa aceitar cegamente as suas sugestões.

#### h) Custo

Os custos de um SE concentram-se nas licenças da linguagem ou do *shell* empregado, no desenvolvimento e manutenção do sistema, já que o investimento no *hardware* poderá ser dividido com a utilização do computador para outras finalidades além do SE. No caso de aplicações cuja disponibilidade de um especialista humano com conhecimento especializado é escasso e/ou de alto custo, o SE torna-se barato a médio e longo prazo, uma vez que este conhecimento ficará disponível a qualquer momento e tem-se a possibilidade de efetuar novas cópias do sistema.

Na operação em tempo real de subestações, a avaliação dos custos pode ser feita considerando os ganhos que podem ser obtidos na agilização da recomposição e na segurança que o operador terá para executar os controles restaurativos. O SE poderá também ser utilizado para treinamento dos operadores e para os estudos de planejamento na elaboração das IOs.

### 3.6 Conclusões

O emprego das técnicas de IA, como os SEs, na recomposição de Sistemas de Potência permitiu aos pesquisadores da área apresentarem metodologias e estratégias de recomposição que são difíceis de implementar usando apenas ferramentas de processamento numérico, já que a solução deste problema envolve o raciocínio lógico, conhecimento heurístico e julgamento empírico (FINK et al., 1995).

O conjunto dos trabalhos revisados mostra que os SEs possuem características de solução de problemas que não são encontradas em programas convencionais que usam métodos analíticos com formulação numérica, estes por sua vez são empregados com eficiência na solução de análise de redes, seja em regime permanente ou transitório. O uso de ferramentas analíticas para a solução de problemas de fluxo de potência, análise

dinâmica e transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos segundo ADIBI et al. (1994c) é indispensável na elaboração de planos de recomposição.

A complexidade que envolve a recomposição de sistemas de transmissão exige que a busca das soluções empreguem programas analíticos de fluxo de potência em regime permanente e transitórios. Algumas propostas como as que buscam montar o plano de recomposição no momento da falta, dispensando os planos elaborados com estudos preliminares, podem tornar-se inviáveis caso não possuam algum mecanismo que interprete o resultado vindo dos programas analíticos.

As longas linhas de transmissão com centenas de quilômetros, que caracterizam o sistema de transmissão da região sul do Brasil, exigem que estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos sejam empregados na elaboração dos planos de recomposição, isto está definido no documento do ONS, Procedimentos de Rede módulo 21 (ONS, 2000).

Para sistemas que possuem longas linhas de transmissão é fundamental a adoção de SE que contemplem soluções que se baseiam em respostas de estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

No caso brasileiro, o resultado das análises dos estudos preliminares baseados em programas analíticos, estão representadas nas IOs, que são usadas pelos operadores de subestações durante a fase fluente da recomposição. Estas IOs são elaboradas de modo que permitam ao operador executar as ações de controle restaurativo nelas definidos sem que ocorram violações no sistema.

Os trabalhos desenvolvidos no Brasil concentraram a aplicação de SE à operação em tempo real e na fase fluente da recomposição, com a base de regras sendo construída a partir das IOs disponíveis nas empresas.

Apesar dos SEs terem apresentado resultados favoráveis e terem sido recomendados por diversos pesquisadores, pode-se observar que a sua implementação na operação em tempo real é lenta.

Neste capítulo foram apresentados também artigos voltados para os requisitos que devem ser atendidos pelo SE, por exemplo, o artigo de ADIBI et al. (1994b) que não trata de uma rede em particular mas traz o SE aplicado dentro de uma determinada estratégia de recomposição.

Apesar de ser comum o emprego de “shells” prontos no desenvolvimento de SE (HUNEAULT et al., 1994), alguns autores optaram por desenvolver a sua própria ferramenta de desenvolvimento (VALE et al., 1997). Não existem muitas informações sobre quais são os “shells” prontos mais apropriados à recomposição do sistema, isto vem ao encontro das declarações de (HUNEAULT et al., 1994) de que “não há correlação óbvia entre uma aplicação específica em sistemas de potência e a ferramenta de desenvolvimento que é usada”.

No capítulo a seguir será mostrado o desenvolvimento de um protótipo para a recomposição do sistema de transmissão, sendo descritas as etapas de aquisição do conhecimento, sua representação, além dos testes empregados para a verificação e validação da base de conhecimento.

## 4. Desenvolvimento do Sistema Especialista para Auxílio à Recomposição da Transmissão

### 4.1 Introdução

A atuação das empresas de transmissão de energia elétrica no novo contexto do setor elétrico brasileiro, tema do capítulo 1 deste trabalho, e a difícil e complexa tarefa que envolve a recomposição e a capacidade de representação do conhecimento humano por Sistemas Especialistas, descritos nos capítulos 2 e 3 respectivamente, formam o cenário para o desenvolvimento do SE aqui descrito.

A proposta inicial e que norteou a construção do Sistema Especialista teve as seguintes premissas:

- Que fosse aplicado à recomposição na fase fluente para subestações de transmissão;
- Que a base de conhecimento fosse construída a partir das IOs que são utilizadas pelos operadores;
- Que o SE possuísse características de uso, em tempo real, exigindo uma integração com um Sistema de Supervisão e Controle;
- Que o SE pudesse ser desenvolvido a partir de um *shell* pronto e disponível para uso, mas de baixo ou nenhum custo;
- Que o SE pudesse ser executado em plataformas de *hardware* ou sistemas operacionais diferentes.

O Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão (SART) foi desenvolvido para ser utilizado pelos operadores de subestação de sistemas de transmissão de energia elétrica, os quais operam a subestação a partir de sistemas SCADA, tanto aquelas subestações operadas localmente quanto as que são operadas por centros de operação que concentram mais de uma subestação e ficam localizados distantes das subestações

controladas. Centros de operação com função de supervisão do sistema também podem se beneficiar do SART utilizando-o para acompanhamento do processo restaurativo.

O protótipo do sistema foi desenvolvido tendo como base a subestação de Areia, porém é possível incluir outras subestações, neste mesmo sistema, tornando-o próprio, para ser utilizado em um centro de operação de subestações.

No item 4.2 deste capítulo, são apresentadas as motivações para a definição e escolha do *shell*, bem como algumas de suas características, já no item 4.3 encontra-se a arquitetura do SART que mostra a integração ao Sistema de Supervisão e Controle (SSC) e a *interface* com o usuário. As fases de desenvolvimento do SE e os testes realizados para verificação e validação da ferramenta estão descritos no item 4.4, e por fim, no item 4.5 é mostrada a abordagem feita para a subestação de Areia e as características desta subestação.

## 4.2 A Escolha do Shell

HUNEAULT et al. (1994), na conclusão da sua pesquisa, declaram que não existe uma relação óbvia entre uma aplicação específica em sistemas de potência e a escolha da ferramenta de desenvolvimento do SE.

A escolha do *shell* foi orientada pelas premissas estabelecidas, ou seja, buscou-se um *shell* disponível para uso e que tivesse alguma facilidade de integração com outros aplicativos com o objetivo de ser integrado ao SSC. Como os SSC são disponíveis em diversos tipos de plataformas computacionais, o ideal era um *shell* que pudesse rodar em plataformas de *hardware* e *software* diferentes, flexibilizando sua integração e tornando-se independente da plataforma do SSC que viesse a ser adotado.

Esta última consideração foi o que nos levou a buscar um *shell* que fosse escrito em linguagem Java™, já que esta linguagem tem como característica a capacidade de rodar em diversas plataformas, e também pelo fato de que possui uma série de facilidades de integração através de API<sup>10</sup>.

Apesar de não estar em destaque nas premissas, sabíamos que o fator custo poderia ser impeditivo na escolha do *shell*, pois os preços apresentados por HUNEAULT et al.

<sup>10</sup> *Application Program Interface* (API) são programas feitos por usuários que podem ser utilizados em outras aplicações.

(1994) mostram uma ampla faixa de valores que vão desde 50 até 9.000 dólares americanos para ferramentas destinadas à plataforma PC. Sabíamos também que usando encadeamento para frente (*forward chaining*) teríamos uma semelhança com a forma do operador recompor o sistema. Assim, buscou-se por um *shell* que permitisse este tipo de encadeamento.

A partir de uma busca na Internet chegamos ao Java Expert System Shell (JESS). O fato do JESS ser escrito em linguagem Java, de possuir métodos de inferência com encadeamento para frente e para trás, também de permitir a edição das regras a partir de um editor de textos convencional e de conceder licenças de uso gratuitas para universidades foram os fatores preponderantes na decisão da escolha do JESS para o desenvolvimento deste protótipo.

#### 4.2.1 Características básicas do Jess

O JESS é uma ferramenta de *software* utilizada para construir SE e foi desenvolvida por Ernest J. Friedman-Hill como parte de um projeto de pesquisa do Sandia National Laboratories, localizado na cidade de Livermore Califórnia, EUA. O JESS é uma implementação em linguagem Java do CLIPS<sup>11</sup>, e assim como o CLIPS, o JESS utiliza um algoritmo especial chamado RETE<sup>12</sup>, usado para tornar mais eficiente o processo de busca do motor de inferência. GIARRATANO e RILEY (1998) pág. 478, utilizam-se das quatro figuras abaixo, fig.4.1 a,b,c e d, para explicarem o funcionamento do algoritmo RETE. A fig. 4.1a mostra um modelo do processamento do algoritmo RETE em um SE. O casamento (*matching*) de fatos e regras é processado pelo motor de inferência apenas uma vez. O motor de inferência examina cada regra, verificando se suas condições são satisfeitas pelos fatos e as regras selecionadas são colocadas na agenda para serem disparadas de acordo com um determinado método de resolução de conflito. GIARRATANO e RILEY (1998) utilizam a fig. 4.1b para mostrar que se o processo de busca da solução se processasse apenas um ciclo, bastaria fazer o casamento entre fatos e regras uma vez. Porém, como o processamento se dá em vários ciclos, novos fatos são

<sup>11</sup> CLIPS é uma ferramenta de desenvolvimento de sistemas especialistas baseado em regras, escrita em linguagem "C" que foi desenvolvida pela NASA.

<sup>12</sup> Segundo GIARRATANO e RILEY (1998), pág. 32, o algoritmo RETE, *Retre Pattern-Matching Algorithm*, foi desenvolvido por Charles L. Forgy em 1979 em sua tese de PhD na Universidade de Canegie-Mellon.

gerados pelas regras disparadas e, na maioria das linguagens baseadas em regras, o

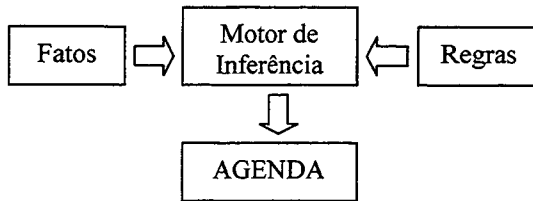


Fig. 4.1a – Modelo de busca de dados e regras

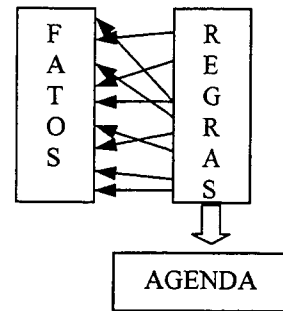


Fig. 4.1b – Regras que buscam os fatos

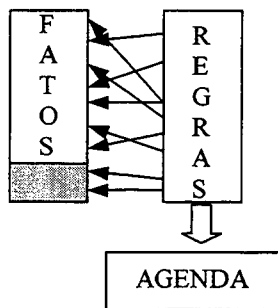


Fig. 4.1c – Esforço computacional desnecessário quando regras procuram os fatos

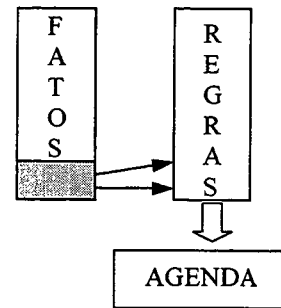


Fig. 4.1d – Fatos buscam as regras

Figura 4.1 – Processos de buscas

processo de análise das regras se repete a cada ciclo. Como o percentual dos fatos alterados em relação ao total de regras é baixo (fig. 4.1c) isto gera ineficiência computacional. O RETE, por sua vez, parte do pressuposto que em cada ciclo de execução uma pequena parte da lista de fatos é adicionada ou removida da agenda e por conseqüência somente uma pequena parte das regras é afetada pelas alterações na lista de fatos ( fig. 4.1-d ). Na medida em que as regras são selecionadas para disparo, o RETE armazena informações destas regras em uma rede, fazendo com que em cada novo ciclo sejam buscadas somente as regras que ainda não tenham padrões estabelecidos na rede, obtendo-se, desta forma, velocidade de execução do motor de inferência. Uma desvantagem deste algoritmo, é que exige bastante memória para que seja possível guardar na rede as informações dos padrões estabelecidos pelas regras.



O JESS possui opções para método de inferência com encadeamento para frente ou para trás e a estratégia de busca pode ser em profundidade ou em largura. A definição da estratégia de busca implica a escolha do modo de resolução de conflito. A resolução de conflitos leva em conta a prioridade definida para as regras. Regras de mesma prioridade serão disparadas dependendo da estratégia de busca selecionada. Se for a busca em profundidade a regra que foi selecionada por último será a primeira a ser disparada, enquanto que para a busca em largura a primeira regra selecionada também será a primeira a ser disparada.

O JESS permite que o SE seja desenvolvido em módulos, assim as regras podem ser atribuídas a módulos diferentes, o que segundo GIARRATANO E RILEY (1998), pág. 454, permite melhor controle de fluxo e execução das regras o que é recomendável para SEs com muitas regras ou que requeiram controle de execução.

A construção do SE pode ser feita diretamente no “prompt” de comando do JESS ou através de um editor de texto convencional que a partir de comandos apropriados carrega o conteúdo deste arquivo para o JESS. Como qualquer ferramenta de programação, a edição obedece a regras de sintaxe. A estrutura das regras tem três campos de preenchimento, o nome da regra, a condição ou lado esquerdo da regra e a ação ou lado direito da regra, conforme mostrado abaixo:

```
(defrule <nome da regra>
  < condição >
  =>
  < ação > )
```

<nome da regra> é utilizado para a definição do nome da regra e também, no caso de utilização de estruturas com módulos, para a definição do módulo a que pertence a regra. O campo < condição > é utilizado para a definição das condições que devem ser satisfeitas para que ocorra o disparo das regras e em < ação > são colocadas as ações que devem ser executadas quando do disparo da regra.

Este tipo de representação é conhecido na literatura como regras de produção, por serem constituídas de “pares de expressão consistindo de uma condição e uma ação” (BITTENCOURT, 1998).

No exemplo abaixo, na edição de uma regra a condição de disparo da regra é o estado “ABERTO” de determinado disjuntor, identificado como “DJ1010”, caso a condição ou condições sejam verdadeiras uma ou mais ações são executadas. Aplicando no formato padrão de regras do JESS, temos:

```
( defrule verifica-estado-disjuntor
  (Disjuntor(id DJ1010) (estado ABERTO))
  =>
  (assert (resposta (agir fechar-disjuntor))) )
```

A regra do exemplo acima será colocada na agenda pronta para ser disparada, sempre que na lista de fatos, ou memória de trabalho, contiver o fato informando que o disjuntor “DJ1010” está “ABERTO”, este fato é gerado no JESS a partir do seguinte comando:

```
(assert (DJ(id DJ1010) (estado ABERTO)))
```

Caso se desejasse alterar o estado para “FECHADO”, então o comando adequado seria:

```
(modify (DJ(id DJ1010) (estado FECHADO)))
```

Na prática este fato será “capturado” de uma base de dados de um Sistema de Supervisão e Controle que espelha o estado do equipamento na subestação.

O desenvolvimento da base de conhecimento no JESS exige um domínio das funções e sintaxes, porém não requer conhecimento prévio em linguagem de programação para a edição das regras e uso do JESS.

A concessão de uso do JESS foi obtida pelo departamento de Engenharia Elétrica da UFSC através da licença acadêmica no. 01-N00335. Como o JESS é gratuito para uso acadêmico, não há custo para seu uso neste desenvolvimento. A versão utilizada é a 6.0b1 de 12 de setembro de 2001.

Uma facilidade importante para os usuários, e encontrada no JESS, é o acesso aos manuais através da Internet no *site* <http://herzberg.ca.sandia.gov/jess>. Existe também uma lista de usuários na qual problemas e dúvidas com o JESS são respondidas por algum dos usuários cadastrados, ou como freqüentemente acontece, pelo próprio criador do JESS, o Sr. Ernest J. Friedmann-Hill. A lista de usuários do JESS permite ao desenvolvedor do SE um conforto durante o desenvolvimento, já que o suporte dado às possíveis dúvidas e/ou problemas são apreciados por usuários e pelo criador do JESS.

### 4.3 A arquitetura do Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão – SART

A definição da arquitetura aqui apresentada é decorrente das características do JESS, da necessidade de *interface* com o SSC e em função do processo de execução da recomposição.

A arquitetura do sistema, mostrado na fig. 4.2 abaixo, é formada por cinco módulos: o sistema especialista; o núcleo de controle; a *interface* com o SSC; a *interface* gráfica com o usuário e o identificador da falta.

O JESS permite que o usuário desenvolva funções para, por exemplo, transferir valores entre o JESS e um outro programa com código Java, que podem ser chamadas a partir do JESS. Nesta aplicação todos os outros elementos que compõem a arquitetura, inclusive o núcleo de controle estão escritos em linguagem Java, facilitando, desta forma, a



Fig. 4.2 – Arquitetura do SART

transferência de valores e chamadas entre os módulos Java e o JESS.

O núcleo de controle foi criado neste protótipo para executar as tarefas de “gerenciamento” da execução e troca de informações entre os módulos. Por exemplo, durante a recomposição, quando uma regra é disparada no SE e necessita de informações do processo elétrico para prosseguir a recomposição, o núcleo de controle tem informações do atual estágio da recomposição e solicita as informações necessárias ao SSC repassando a resposta recebida ao SE, que prossegue na execução das regras.

A *interface* com o SSC é feita através do núcleo de controle e usa o conceito de *socket*<sup>13</sup> para transferência de dados da base de tempo real do SSC para o JESS. O *socket* permite que o SSC esteja sendo executado em uma determinada máquina de uma rede de computadores e o SART em outra. A opção em utilizar os *sockets* veio pelo fato de que o SSC escolhido já permitia o uso desta facilidade, e nesta implementação, é um modo mais simples de acesso aos dados do SSC. Outra opção seria o acesso a banco de dados relacional, por exemplo, o que exigiria configurações do banco de dados e também seria mais um recurso de computação a ser desenvolvido e gerenciado, enquanto que com o *socket* foram necessárias apenas algumas linhas de programação em JAVA.

A *interface* gráfica com o usuário foi construída pensando-se em disponibilizar as informações ao operador seguindo a mesma linguagem das IOs e que a atuação do operador durante a recomposição no sistema de transmissão acontecesse através do Sistema de Supervisão e Controle. Portanto, não é possível, neste protótipo, o envio de comandos ao SSC através da *interface* gráfica, porém esta facilidade é possível de ser implementada e traria vantagens na utilização do SART. A *interface* gráfica é dividida em quatro áreas (fig. 4.3). Na área 1, encontram-se as opções dos tipos de desligamentos presentes nas IOs : desligamento geral, desligamentos individualizados por circuitos e de transformadores. Na área 2, é sempre apresentada a última sugestão de ação, ou explicação, feita pelo SE. Na área 3, fica o histórico do processo de recomposição, e por fim, na área 4, os botões com as opções iniciar, parar, continuar e pular passo. O botão “iniciar” é utilizado para dar partida no processo de recomposição, após selecionado o tipo de falta na área 1. O botão “parar” tem o objetivo de interromper o processo em execução

<sup>13</sup> Segundo FLANAGAN (1997) pág. 189 *socket* é uma classe em Java que é usada para conectar um cliente a um servidor através de uma rede de computadores.

caso desejado, e o botão “continuar” foi contruído para que após uma intervenção no sistema elétrico recomendado pelo SART, por exemplo, uma manobra de disjuntor, ao pressionar o botão, o operador indica que executou a tarefa e prossegue no processo de recomposição. A opção “pular passo” foi construída vislumbrando-se a possibilidade de

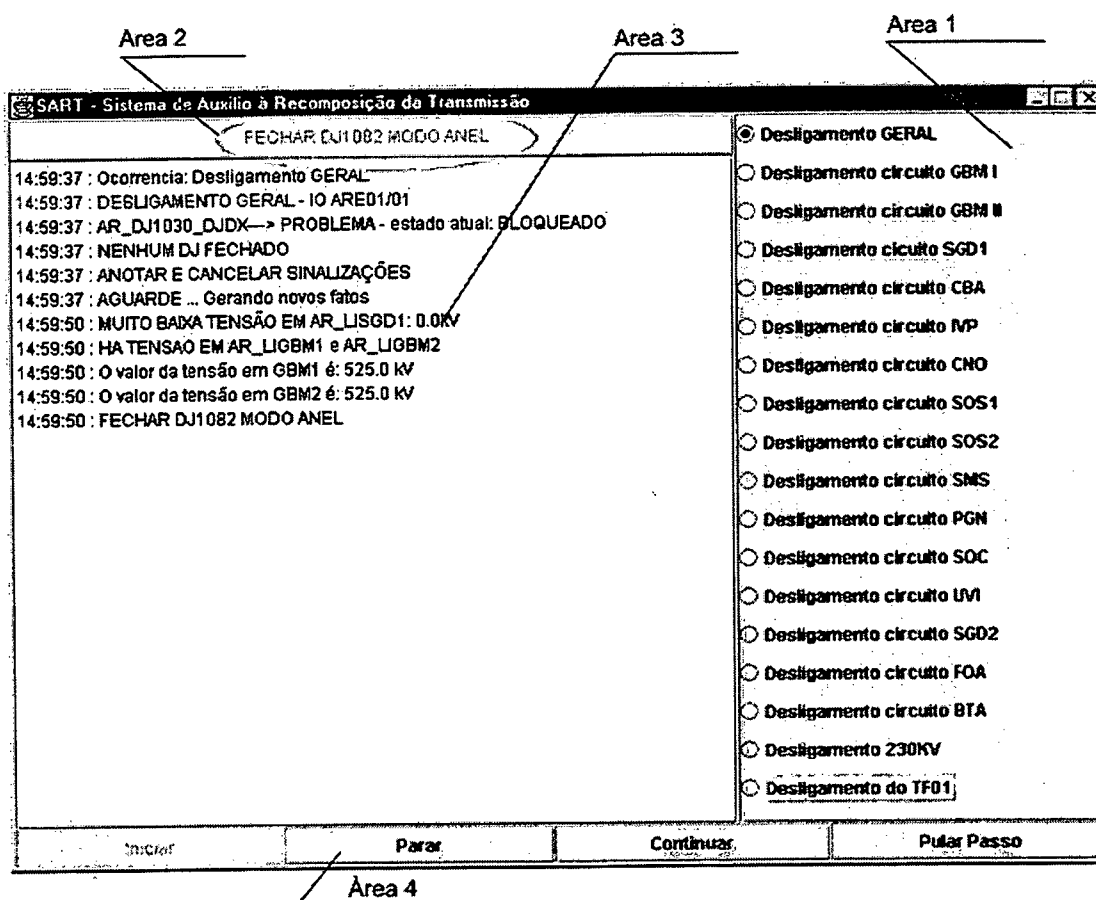


Figura 4.3 – Interface homem-máquina

que a execução de uma ação recomendada não ter sido possível, ou no caso de um problema na supervisão da posição de um equipamento. Por exemplo, o operador executa um comando de fechamento de disjuntor mas, por algum motivo, o SSC continua indicando disjuntor aberto, apesar do operador ter certeza da efetivação do comando e desejar continuar o processo de recomposição, então, nestes casos pode-se utilizar a opção “pular passo”.

Por fim, o identificador da falta, que não é objeto deste trabalho, foi substituído pelo usuário que inicializa o disparo das regras no processo de recomposição da fase

fluente. Para cada tipo de desligamento, seja um desligamento geral ou parcial, as IOs prevêm ações específicas (ver neste trabalho o item 2.7.1). Aqui a simplificação é feita usando uma entrada manual para a seleção do tipo de falta, substituindo desta forma um sistema de identificação de falta em tempo real. É sabido que para uso em produção é conveniente a integração com um sistema inteligente de identificação de falta, porém a forma aqui utilizada, com uma entrada manual de seleção, não inviabiliza a sua aplicação em tempo real e torna-se importante para o caso de simulações com o objetivo de treinamento de operadores e validação das regras. Este tipo de seleção de falta também poderia ser utilizado como entrada em um configurador de rede<sup>14</sup>.

O SSC, utilizado neste desenvolvimento, foi o Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (SAGE) desenvolvido pelo CEPEL<sup>15</sup>. Esta opção deve-se aos seguintes motivos: o SAGE é utilizado por várias empresas do setor elétrico, inclusive a ELETROSUL; a subestação de Areia, usada neste protótipo, tem instalado o SAGE permitindo que se utilizasse a mesma configuração atualmente em operação; o SAGE disponibiliza um acesso à base de dados em tempo real através do uso de *socket* e também pela experiência já adquirida com este sistema.

## 4.4 O Desenvolvimento do Sistema Especialista

A construção de um SE envolve várias etapas, das quais destacamos, neste trabalho, a etapa de aquisição do conhecimento, a de representação deste conhecimento e os testes de verificação e validação.

### 4.4.1 A Aquisição do Conhecimento

Segundo BITTENCOURT (1998), na página 55, a parte mais difícil no desenvolvimento de um SE é a aquisição do conhecimento, que pode estar contido em manuais, livros ou ser de domínio de um especialista humano. A pessoa, ou o grupo de pessoas, que realizam esta tarefa, são conhecidas como engenheiro(s) do conhecimento (RAM, 1997), pág. 556.

<sup>14</sup> Configurador de rede são programas utilitários que auxiliam o usuário na configuração de redes elétricas utilizadas em programas de análise numérica como os de fluxo de potência.

<sup>15</sup> O Centro de Pesquisa de Energia Elétrica CEPEL foi criado em 1974 e tem sede no Rio de Janeiro/RJ, volta-se à pesquisa e serviços de tecnologia.

O engenheiro do conhecimento de posse do conhecimento deve traduzí-lo para uma linguagem adequada à ferramenta de desenvolvimento do SE.

Neste trabalho isto foi facilitado, uma vez que a base de conhecimento foi construída baseada na IOs já prontas que são utilizadas pelos operadores para a recomposição do sistema e o engenheiro de conhecimento também desempenhou o papel do especialista. Já em uma implementação para produção em subestações é indispensável a presença do operador e do engenheiro especialista que elabora as IOs.

O conhecimento utilizado neste trabalho é basicamente encontrado nas IOs sob três formas de representação: com descrição textual fig 4.4a; com descrição tabular fig. 4.4b e através de fluxogramas fig. 4.4c.

4 - PROCEDIMENTOS EM CASO DE DESLIGAMENTO GERAL

- 4.1 - abrir ou manter aberto todos os disjuntores dos setores de 525, 230, 138 e 13,8 kV dos Transformadores TF 1 e TF 3;
- 4.2 - anotar e cancelar todos os alarmes e sinalizações atuados dos sistemas de proteção, controle e supervisão da unidade. Cabe salientar que o rearme do relé de Bloqueio só poderá ser efetuado com autorização do COT;
- 4.3 - se houver tensão de retorno de Segredo 1, proceder conforme segue:
  - 4.3.1 - religar o disjuntor do circuito Segredo 1;
  - 4.3.2 - recompor o Transformador II de 525/230 kV, conforme IO ARE-03/01;
  - 4.3.3 - recompor os Transformadores I e III de 230/138 kV, e setor de 138 kV conforme IO ARE-03/03;
  - 4.3.4 - recompor o circuito São Mateus do Sul, conforme IO ARE-02/07;

6 - PROCEDIMENTOS EM CASO DE DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DO CIRCUITO GSM 1

6.1 Estado satisfaitas as condições para a recomposição	6.1.1 Com tensão de retorno - fechar ou sincronizar o disjuntor do circuito, DJ1082, conforme IO ARE-04/02	6.1.1.1 Circuito CURITIBA energizado ou isolado - fechar ou sincronizar o DJ 1090 (central), conforme IO ARE-04/02	6.1.1.2 Circuito CURITIBA desenergizado sem estar isolado - manter o disjuntor DJ1090 (central), aberto - comunicar a ocorrência ao COT
6.1.2 Sem tensão de retorno - aguardar tensão de retorno	6.1.2.1 Após restabelecida a tensão de retorno - proceder conforme item 6.1.1	6.1.2.2 Há demora superior a 3 minutos para restabelecer tensão de retorno	

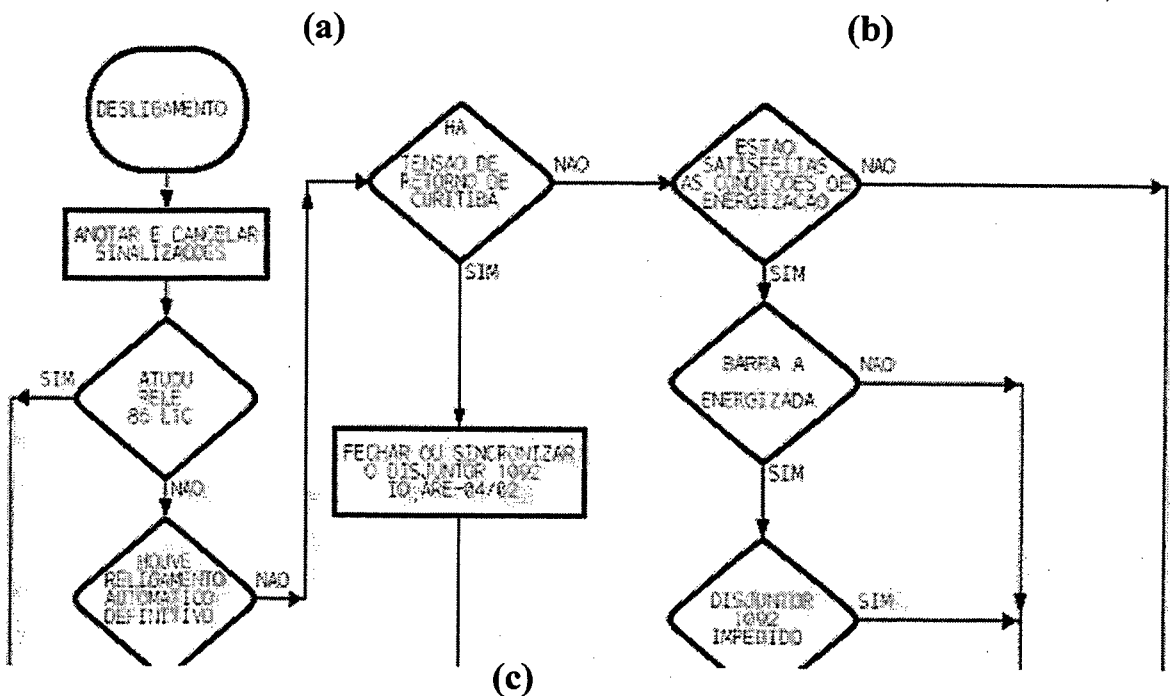


Figura 4.4 – Formas de representação do conhecimento encontrado nas IOs

Ao executar a tarefa de aquisição do conhecimento e traduzí-lo na sintaxe apropriada à ferramenta em uso, muitas vezes o engenheiro do conhecimento se depara com informações que podem estar incompletas ou são implícitas para o especialista, sendo necessário que o especialista esclareça as dúvidas ou a forma de implementação da informação. Por exemplo, a instrução “circuito isolado” pode levar a algumas reflexões como: circuito isolado significa que o isolamento é definido pelo estado dos disjuntores, ou pode significar o isolamento também feito pelas chaves seccionadoras, ou ainda, o isolamento inclui o desligamento da linha na outra extremidade da subestação em que se está trabalhando.

O conteúdo detalhado das IOs e a forma de apresentação do conhecimento nelas contido facilitaram a sua representação no JESS. Contudo, a implementação da *interface* do SE o SSC em tempo real, exigiu que fossem incluídas regras que estão implícitas nas instruções e/ou são óbvias ao especialista. Por exemplo, a instrução “fechar disjuntor” mostrada na figura 4.4c, não deixa explícito que a seqüência da recomposição, após esta ação, deva considerar ou não a efetivação do fechamento do disjuntor, isto exige uma consulta do engenheiro do conhecimento ao especialista. Caso esta efetivação seja necessária, também deve-se capacitar o SE para verificar se houve ou não o fechamento do disjuntor.

Neste protótipo foram adotadas algumas definições de seqüência de operação, como descrito acima na confirmação do estado do disjuntor após uma ação do operador, as quais normalmente seriam esclarecidas com a ajuda de um especialista.

#### 4.4.2 A Representação do Conhecimento

A representação do conhecimento, neste trabalho, seguiu o padrão do JESS, empregando os *frames* para representação dos fatos. Cada *frame* é composto por atributos aos quais são atribuídos valores. Nos *frames* os atributos são chamados *slots*. Para cada tipo de elemento que compõe a subestação foi definido um *frame*, por exemplo, o elemento linha de transmissão foi representado conforme mostra a fig. 4.5 abaixo.



FRAME: LT – Linha de Transmissão	
Atributos	Valor
id	ARE_LTGBM1
kV	525.0
MW	0.0
MVAR	0.0
kA	0.0

Fig. 4.5 – Representação por *frames* do elemento Linha de Transmissão

No JESS a estrutura do *frame* linha de transmissão é representada com a seguinte sintaxe:

(*deftemplate MAIN::LT "Linha de Transmissao"* → define o nome do tipo do objeto  
*(slot id)* → identificador do nome da linha  
*(slot kV)* → *slot* do valor da tensão  
*(slot MW)* → *slot* do valor da potência ativa  
*(slot MVAR)* → *slot* do valor da potência reativa  
*(slot kA)* → *slot* do valor da corrente na linha

As IOs contemplam desligamentos gerais e parciais, sendo divididas por setores que representam os vários níveis de tensão da subestação, e cada circuito e equipamento possui instruções individuais de recomposição. No caso de um desligamento parcial, que afeta apenas um determinado circuito, são aplicáveis as instruções relacionadas a ele, caso o desligamento envolva mais de um circuito, como é o caso de um desligamento geral, a recomposição da subestação é feita dispondo os vários circuitos envolvidos em determinada ordem de recomposição. Logo, em termos gerais, podemos dizer que a recomposição da subestação é o somatório das recomposições individuais de cada circuito e equipamento envolvido.

Cada circuito é composto por um conjunto de instruções que foram traduzidas em regras durante a implementação do SE. Para representar cada um destes circuitos e/ou

equipamentos foi utilizado o conceito de *módulo*. Cada módulo foi projetado para conter o conjunto completo das regras do circuito, por exemplo, o circuito Governador Bento Munhoz da Rocha Netto1 (GBM1) foi representado a partir do módulo com a seguinte sintaxe:

```
(defmodule ARE02-01-GBM1)
```

No desenvolvimento deste protótipo de SE foram configurados 70 módulos para representar a subestação de Areia, sendo que 15 deles referem-se aos circuitos e os restantes, a equipamentos como transformadores e disjuntores.

A utilização de módulos permite que a base de conhecimento seja dividida em vários “espaços de trabalho”, sendo que as regras pertencentes a determinado módulo serão disparadas somente quando o módulo, espaço de trabalho, for selecionado (GIARRATANO e RILEY, 1998). Isto se torna interessante para a representação do conhecimento da recomposição, uma vez que a recomposição da subestação é resultado do somatório de cada circuito (módulo), dispostos em uma ordem adequada de execução. Portanto, para a efetivação da recomposição basta selecionar os módulos apropriados, dispô-los na ordem adequada de execução e solicitar ao motor de inferência o início do processo de seleção e disparo das regras conforme o módulo ou “espaço de trabalho” selecionado.

O conceito de módulos também foi implementado com o objetivo de que as regras fossem contruídas com uma sintaxe que fosse parecida com a semântica utilizada nas IOs. Na figura 4.6 abaixo, pode-se observar que a sintaxe da regra onde há a definição do módulo “ARE02-01-GBM1” refere-se à IO do circuito GBM1. No anexo 3, encontram-se

```
(defrule ARE02-01-GBM1::611-ha-tensao-retorno
  ?fase <- (fase verif-tensao-retorno-GBM1)
  (LT(id ARE_LIGBM1) (kV ?t-LIGBM1&:(>= ?t-LIGBM1 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  | (bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1082")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1082)
  (assert (fase ver-circ-curitiba)))
```

Figura 4.6 – Representação da Regra conforme IO

as Instruções Operacionais usadas para a recomposição do circuito GBM1.

Pode-se observar que no título da regra o número 611 refere-se ao item 6.1.1 da IO do circuito GBM1, já o lado esquerdo da regra é a parte em negrito, enquanto o lado direito refere-se, no texto, a uma ação descrita na IO.

Segundo FRIEDMAN-HILL (2001), item 2.10, para SEs com muitas regras é recomendado o uso de módulos, pois esta estrutura permite um melhor controle sobre a interferência de uma regra em outra, uma melhor organização das regras, além de facilitar sua localização e domínio sobre quais regras de quais módulos estão sendo atualizadas ou modificadas.

Dentro destes módulos adotou-se um controle de fluxo de execução, seguindo a recomendação de GIARRATANO E RILEY (1998) pág. 449. Isto é feito dotando as regras de um padrão de controle de controle atribuindo fases em que a regra é aplicada. Na fig. 4.6, acima, é possível identificar a atribuição deste conceito. Este controle de fluxo de execução é necessário pois as IOs trazem definidas as seqüências de execução dos comandos que devem ser respeitadas garantindo a integridade do sistema.

#### **4.4.3 O Motor de Inferência**

Neste item descreve-se como foram definidos o método de inferência ou raciocínio, a estratégia de busca e como é efetuada a resolução de conflitos no JESS.

##### **a) Método de Inferência ou Raciocínio**

Conforme descrito no item 3.2 deste trabalho, os métodos de inferência mais comuns são o encadeamento para frente e o encadeamento para trás. Neste desenvolvimento, optou-se pelo encadeamento para frente, uma vez que, na recomposição com o SE obtendo dados em tempo real do sistema elétrico (fatos no SE), são as informações do processo elétrico, ou seja os fatos, que iniciam o processo de identificação do desligamento e, em seguida, a recomposição.

##### **b) Estratégia de busca e resolução de conflito**

A estratégia de busca em profundidade é a que melhor se adapta a este problema, já que o processo de recomposição tem seqüência e ordem definida dos equipamentos e/ou circuitos que devem ser operados, com as regras sendo disparadas segundo esta seqüência. Uma determinada seqüência de operação apresentada nas IOs está sempre condicionada ao atendimento de premissas que representam determinada condição do sistema, com

característica de busca em profundidade na seqüência de processamento das regras. É importante lembrar, como apresentado no item 4.2.1, que o JESS tem a estratégia para resolução de conflitos atrelada ao tipo de busca e para o caso da busca em profundidade, a resolução de conflitos opta por disparar em primeiro lugar a última regra selecionada.

#### 4.4.4 Testes em um Sistema Especialista

Os testes comumente utilizados em engenharia de *software* e estendidos aos sistemas especialistas envolvem os processos de verificação e validação (V&V).

Sabe-se que os processos de V&V, no desenvolvimento de *software*, são importantes para assegurar a confiabilidade e a qualidade dos produtos. RAM (1997) declara que estes processos são elementos críticos no desenvolvimento de qualquer projeto envolvendo engenharia de *software*.

A definição encontrada em IEEE (1990) e evidenciada por ROLIM (1995) para estes processos é apresentado abaixo:

- Verificação: Processo de avaliar um sistema ou componente determinando se o produto satisfaz ou não os objetivos estabelecidos para aquela fase.
- Validação: Processo de avaliação de um sistema ou componente, durante ou no fim do desenvolvimento para determinar se os requisitos especificados estão satisfeitos.

TSAI et al. (1999) consideram que além das verificações usuais utilizadas no desenvolvimento de *software*, tais como: inconsistência, ambigüidade e de sistema completo, para sistemas especialistas também deve-se considerar a interação entre a base de conhecimento e o motor de inferência.

A literatura apresenta algumas dificuldades no uso de V&V em SE. TSAI et al. (1999) relatam alguns fatores que podem promover dificuldades, como a verificação de inconsistências e redundâncias em grandes bases de conhecimento. RAM (1997), por sua vez, atribui como dificuldade no processo de verificação o fato de que durante o desenvolvimento é comum acontecerem modificações na especificação inicial do *software* de SE.

Na pesquisa feita por TSAI et al. (1999), a totalidade dos usuários classificaram V&V como uma tarefa difícil para ser executada em SE.

Observa-se, desta forma, que a formulação de um procedimento formal para testes de SE é uma tarefa difícil que envolve além da etapa de desenvolvimento, também a de manutenção do sistema.

GIARRATANO e RILEY (1998) na pág. 314 listam cinco erros que podem ser encontrados durante o desenvolvimento de SE, são eles:

- Erros do conhecimento do especialista, que podem advir de um conhecimento incorreto ou incompleto do especialista humano;
- Erros de semântica, que podem surgir quando o engenheiro do conhecimento ao tentar interpretar o conhecimento do especialista não o compreende corretamente. Isto reflete-se na base de regras, em que poderão faltar regras, haver regras conflitantes, ou ainda, redundantes.
- Erros de sintaxe, que ocorrem pela forma incorreta de representar uma regra ou fato na sintaxe apropriada do *shell*.
- Erros de inferência, que podem ser decorrentes de um conhecimento incorreto, erros de semântica, *bugs* do motor de inferência ou má definição da integração entre regras.

No item 4.5.3, a seguir, é mostrado como foram desenvolvidos os testes para o protótipo desenvolvido para a subestação de Areia.

#### **4.5 Abordagem para a Subestação de Areia**

A subestação de Areia foi escolhida neste trabalho por ser uma subestação importante na fase fluente da recomposição do sistema de potência da região sul do Brasil.

A subestação de Areia está inserida em uma área geelétrica (anexo 1) onde as usinas de Segredo e Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto são as usinas de auto-restabelecimento e, no caso de um blecaute, são responsáveis pelo início do processo de recomposição.

A subestação de Areia assume um papel fundamental durante a fase fluente da recomposição da área de auto-restabelecimento, pois além de alimentar importantes centros de carga também participa da interligação com o Sudeste, através da subestação de Salto Santiago.

#### **4.5.1 Características da Subestação de Areia**

A subestação opera nas tensões de 525, 230 e 138 kV, possui um transformador de 525/230 kV com potência de 672 MVA e outros dois transformadores de 230/138kV com potência que totalizam 300 MVA. O anexo 2 mostra o diagrama unifilar da subestação de Areia.

#### **4.5.2 Características do Sistema Especialista Implementado**

Para representar as 17 instruções operacionais referentes à recomposição da subestação de Areia que engloba os casos de desligamento geral e parcial foram necessárias 686 regras. Alguns exemplos destas regras são apresentados no anexo 5 deste trabalho.

#### **4.5.3 Testes realizados**

Os testes executados neste trabalho foram divididos em duas fases: a fase de testes do SE sem a integração ao SSC e a fase de testes do SE integrado ao SSC.

Os testes foram feitos por módulos seguindo a mesma forma adotada para o desenvolvimento da base de conhecimento, ou seja, cada circuito foi testado individualmente e nos testes de desligamento geral houve a integração dos vários circuitos.

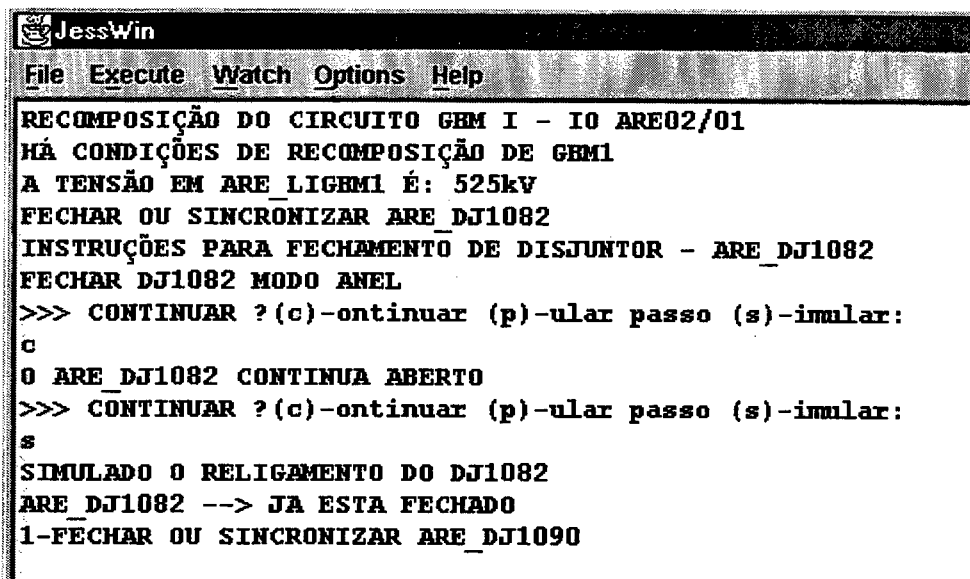
Os testes foram feitos buscando cobrir todas as situações possíveis de serem executadas para cada circuito, procurando, com isto, garantir que o sistema está completo e consistente com as respostas esperadas em conformidade com as IOs. Assim, buscou-se também verificar a exatidão, integridade e consistência do SE, como sugerem GIARRATANO e RILEY (1998) na página 324, através da busca de respostas incorretas, incompletas e/ou inconsistentes. A maioria das correções foram devido a regras incorretas que não traziam todas as condições ou omitiam alguma, conseqüentemente havia o disparo incorreto ou não de alguma regra.

Durante os testes, buscou-se também o refinamento da base de regras para que o conhecimento no SE ficasse conciso, no entanto, a representação das regras de forma similar com as IOs precederam ao refinamento.

##### **a) A fase de testes do SE sem a integração ao SSC**

Os testes desta fase foram feitos na janela de programação do JESS como mostra a figura 4.7. Carregava-se a base de regras e em seguida um conjunto de fatos que foram

selecionados para representar determinado cenário de desligamento da rede elétrica. Com isso buscou-se validar as regras segundo as IOs.



```
JessWin
File Execute Watch Options Help
RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO GEM I - IO ARE02/01
HÁ CONDIÇÕES DE RECOMPOSIÇÃO DE GEM1
A TENSÃO EM ARE_LIGEM1 É: 525kV
FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1082
INSTRUÇÕES PARA FECHAMENTO DE DISJUNTOR - ARE_DJ1082
FECHAR DJ1082 MODO ANEL
>>> CONTINUAR ?(c)-ontinuar (p)-ular passo (s)-imular:
c
O ARE_DJ1082 CONTINUA ABERTO
>>> CONTINUAR ?(c)-ontinuar (p)-ular passo (s)-imular:
s
SIMULADO O RELIGAMENTO DO DJ1082
ARE_DJ1082 --> JA ESTA FECHADO
1-FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1090
```

Figura 4.7 Testes efetuados na primeira etapa na janela de edição do JESS

Ações de recomposição dos operadores foram simuladas também dentro da janela de edição do JESS. Por exemplo, uma regra que ao ser disparada recomendava uma ação de fechamento de disjuntor, também disparava outra para a simulação da operação de comando. Na figura 4.7 pode-se observar que a simulação destes comandos foram feitas através de uma entrada pelo teclado, onde as opções disponíveis eram:

- “c” para continuar;
- “p” para pular passo;
- “s” para simular a ação recomendada pelo SE.

Estas opções foram utilizadas durante os testes, procurando simular como seria a ação do operador, que após receber uma instrução de ação, a executa com manobras no sistema, isto é simulado com a opção “s”. No caso de haver algum problema nesta fase a opção “p” permite prosseguir com a recomposição, e a opção “c” foi utilizada para que o operador ao finalizar a(s) ação(ões) pudesse informar ao SE que a recomposição pode prosseguir.

Nestes testes foram elaborados 84 módulos de testes, sendo 78 deles utilizados para os testes dos circuitos, representando os desligamentos parciais da subestação e os outros 6 para o desligamento geral da subestação.

Com isto, procurou-se validar o SE no que se refere às necessidades e requisitos de representação das IOs.

b) A fase de testes do SE integrado ao SSC

Nesta fase de testes as informações do sistema elétrico foram simuladas no Sistema de Supervisão e Controle (SSC), também as ações de controle restaurativo. O SSC utilizado neste trabalho foi o SAGE.

Estes testes também envolveram a integração da *interface* gráfica do usuário com o restante do sistema. As informações de ações, que na primeira fase de testes eram enviadas para a janela de edição do JESS, agora são enviadas para a interface gráfica, onde o operador, após efetuar um controle restaurativo, pressiona o botão “continuar” para prosseguir o processo de recomposição.

Na segunda fase, foram simulados 18 cenários da rede elétrica.

Através do SAGE foi simulado o envio de dados do processo elétrico, usualmente feito através das UTRs, informando os estados dos equipamentos e proteções e os valores de medidas analógicas como tensão e potência. Um exemplo de arquivo de simulação utilizado no SAGE está no anexo 4 deste trabalho.

A solicitação dos dados referentes ao sistema elétrico é sempre iniciativa do SE que informa ao SAGE qual informação deseja obter; por exemplo, um estado de disjuntor (aberto ou fechado) ou uma medida analógica. Estas informações são processadas pelo SE e geram novos fatos. Na seqüência o motor de inferência selecionará as regras adequadas e as executará.

Os testes foram executados iniciando com a seleção do tipo de desligamento, que corresponde a algum tipo de falta do sistema. Em seguida ao pressionar o botão “iniciar” o motor de inferência seleciona as regras que se adaptam ao estado atual do sistema de transmissão (fatos), recomendando, então, as ações a serem executadas. Estas ações são detalhadas por equipamento e foram simuladas no SAGE. Após estas ações serem executadas, ao pressionar o botão “continuar” são gerados novos fatos, os quais disparam novas regras que solicitam outras ações ao operador. Os testes seguem esta seqüência de simulações no SAGE e ações na *interface* gráfica do SART.

Esta fase de testes envolveu todos os componentes da arquitetura do SART. A *interface* gráfica apresentando os resultados e sugerindo ações ao operador. O SE que, a partir da base de conhecimento e motor de inferência, envia as informações para a



*interface* gráfica. A *interface* entre o SE e o SSC permitiu que fossem obtidos os dados para gerar os fatos, e o núcleo de controle fez o gerenciamento dos pedidos e respostas entre o SE e o SSC.

Nesta fase também foi possível validar as regras em um contexto mais próximo do que é encontrado na operação em tempo real de sistemas de transmissão.

É recomendável que na etapa de validação do sistema também sejam incluídos testes de situações críticas para o sistema, quando os operadores são sobrecarregados com um grande volume de eventos e alarmes além daquelas rotineiras envolvendo desligamentos programados e sob controle. Nestes testes é fundamental a presença do operador e do especialista em recomposição, para que sejam avaliadas a coerência das respostas comparando-se os resultados do processamento feito pelo SE com as respostas esperadas pelos especialistas.

Caso existam dados históricos de ocorrências no sistema, eles podem ser utilizados nestas simulações, bem como para o treinamento dos operadores.

No caso de manutenção do SE, deve-se prever também um conjunto de testes que permitam que sejam verificadas as modificações e/ou inclusões de regras. Deve-se manter, no mínimo, os mesmos objetivos e critérios dos testes efetuados durante a fase de desenvolvimento.

Observou-se nesta fase de testes que o processamento de leitura da informação no SSC e a geração de um novo fato levam 3s para cada leitura efetuada. Para o uso na operação de subestações deve-se buscar mecanismos de redução deste tempo, como por exemplo, as leituras agrupadas ou outros meios mais eficientes de acesso aos dados do que a utilização de *socket*.

#### **4.5.4 Exemplo de um caso de recomposição**

O exemplo apresentado a seguir é para o caso de desligamento geral da subestação, como pode acontecer em um blecaute de grandes proporções. Neste caso, preconiza a fase fluente que, os operadores das usinas iniciam o processo de recomposição sincronizando um número mínimo pré-estabelecido de máquinas e enviam tensão (energizam as linhas) para a subestação ou subestações em que a usina está conectada.

No exemplo simulado abaixo, não há tensão proveniente no circuito da usina de Segredo I (LISDG1) e há tensão em pelo menos uma linha que interliga a subestação de Areia à usina Governador Bento Munhoz da Rocha Neto (LIGBM1).

Todos os controles restaurativos e o comportamento do sistema elétrico foram simulados no SAGE, procurando representar um acontecimento real.

Após a identificação do tipo da falta, neste exemplo, o desligamento geral, seleciona-se esta opção entre outras previstas nas IOs e pressiona-se o botão “iniciar” para começar o processo de recomposição.

Para cada ação recomendada ao operador o SART fica aguardando o pressionar do botão “continuar” para seguir em frente no processo da recomposição. As regras foram desenvolvidas de modo que seja verificada a realização do controle restaurativo sugerido. O processo recomendação de ação e efetivação do controle restaurativo repete-se para todas as etapas da recomposição.

É apresentado a seguir em forma de tabela, a seqüência de recomposição. Na primeira coluna são mostrados os resultados da *interface* gráfica do SART, na coluna do meio o trecho da IO, em forma de fluxograma, correspondente à etapa da recomposição e às mensagens observadas no SART, e na coluna da direita são feitos alguns comentários explicativos.

**15.0011 - Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão**

FECHAR DU1072 MODO ANEL

14.58.37: Ocultar/Desocultar Desligamento GERAL  
 14.59.37: DESLIGAMENTO GERAL - IO ARE0101  
 14.59.37: AR DU1030 DUX-> PROBLEMA - estado atual BLOQUEADO  
 14.59.37: REGRUNDO FECHADO  
 14.59.37: ANOTAR E CANCELAR SINALIZAÇÕES  
 14.59.37: AGUARDE... Gerando novos filios  
 14.59.50: MUITO BAXA TENSÃO EM AR\_LJ05D1: 0.0KV  
 14.59.50: HA TENSAO EM AR\_LJ05M1 e AR\_LJ05M2  
 14.59.50: O valor da tensão em 05M1 e 525.0 KV  
 14.59.50: O valor da tensão em 05M2 e 525.0 KV  
 14.59.50: FECHAR DU1087 MODO ANEL

FECHAR DU1072 MODO ANEL

Desligamento de todos GEM I  
 Desligamento de todos GEM II  
 Desligamento de todos S001  
 Desligamento de todos CBA  
 Desligamento de todos RP  
 Desligamento de todos CMO  
 Desligamento de todos S0051  
 Desligamento de todos S0052  
 Desligamento de todos SMS  
 Desligamento de todos SOC  
 Desligamento de todos IHT  
 Desligamento de todos S002  
 Desligamento de todos T0A  
 Desligamento de todos BIA  
 Desligamento de todos 200V  
 Desligamento de todos T0B1

Para Passo Continuar

Ao iniciar o processo de recomposição com a seleção do tipo de falta e o acionamento do botão “iniciar” o SART lê o estado atual do processo elétrico e no JESS são disparadas as regras pertinentes.

Ao lado é mostrada através das linhas a correspondência entre os resultados do SE e o conteúdo das Instruções Operacionais.

**15.0011 - Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão**

PRESSIONE - CONTINUAR --

14.58.37: Ocultar/Desocultar Desligamento GERAL  
 14.59.37: DESLIGAMENTO GERAL - IO ARE0101  
 14.59.37: AR DU1030 DUX-> PROBLEMA - estado atual BLOQUEADO  
 14.59.37: REGRUNDO FECHADO  
 14.59.37: ANOTAR E CANCELAR SINALIZAÇÕES  
 14.59.50: MUITO BAXA TENSÃO EM AR\_LJ05D1: 0.0KV  
 14.59.50: HA TENSAO EM AR\_LJ05M1 e AR\_LJ05M2  
 14.59.50: O valor da tensão em 05M1 e 525.0 KV  
 14.59.50: O valor da tensão em 05M2 e 525.0 KV  
 15.02.32: RECOMPOSIÇÃO DO TF 2 - IO05-01  
 15.02.32: ANOTAR E CANCELAR SINALIZAÇÕES DE ENERIZAÇÃO  
 15.02.32: VERIFICAR ARE03-CONDIÇÕES DE ENERIZAÇÃO  
 15.02.32: LENDO INFORMAÇÕES DO SAGE  
 15.03.01: TF02 RELE B5T NAO Aludado - RECONFOR TF02  
 15.03.01: DESLIGAMENTO Alta Média e Baxa Tensão e 230 Desenergizada  
 15.03.01: ARE03-CONDIÇÕES DE ENERIZAÇÃO SATISFEITAS  
 15.03.01: RELIAR AR\_DJ792 e AR\_DJ1010  
 15.03.01: FECHAR DU1071 MODO ANEL  
 15.03.33: FECHAR DU1010 MODO ANEL  
 15.03.33: RECOMPOSIÇÃO DO TF 1 - IO ARE03-03  
 15.03.33: FECHAR DU1072 e IO ARE03-03  
 15.03.53: FREISIONE - CONTINUAR --

FECHAR DU1072 MODO ANEL

Desligamento de todos GEM I  
 Desligamento de todos GEM II  
 Desligamento de todos S001  
 Desligamento de todos CBA  
 Desligamento de todos RP  
 Desligamento de todos CMO  
 Desligamento de todos S0051  
 Desligamento de todos S0052  
 Desligamento de todos SMS  
 Desligamento de todos SOC  
 Desligamento de todos IHT  
 Desligamento de todos S002  
 Desligamento de todos T0A  
 Desligamento de todos BIA  
 Desligamento de todos 200V  
 Desligamento de todos T0B1

Para Passo Continuar

Ao verificar a condição dos disjuntores, informa caso algum esteja BLOQUEADO. Observar que na sugestão de fechar disjuntor, também recomenda o modo do fechamento (ANEL ou SINCRONISMO).

O SE fornece explicações e verifica as condições de energização dos equipamentos.

Após cada comando o operador pressiona o botão “continuar”. Para informar a decisão, o SE, também mostra os valores de tensão. Como não há tensão no circuito LISMS, caso houvesse tensão, a IO prevê ações diferentes, das que estão aqui apresentadas.

FECHAR DJ1072 MODO SINCRONISMO  
 150302: LENDO INFORMAÇÕES DO SNAE  
 150301: TFD RELE BRT NÃO ALIADO - RECOMPOR TFD  
 150301: DEBILITAMENTO NA Média e Baixa Tensão e 230 Desenergizada  
 150301: AFREDO - CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO SAKTSIFETAS  
 150301: RELIAR AR\_DJ782 AR\_DJ1010  
 150301: FECHAR DJ782 MODO ANEL  
 150301: FECHAR DJ1010 MODO ANEL  
 150353: RECOMPOSIÇÃO DO TF 1 - IO ARE03-03  
 150353: FECHAR O DJ752 e O DJ842  
 150353: PRESSIÃO - CONTINUAR -  
 150626: RECOMPOSIÇÃO DO TF 3 - IO ARE04-03  
 150626: FECHAR O DJ712 e O DJ692  
 150626: PRESSIÃO - CONTINUAR -  
 150705: RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO SACS - IO ARE0207  
 150705: AQUIARDE - Gerando nova fase  
 150714: A TENSÃO EM AR\_LUB8 É 1,0KV  
 150714: NÃO HA TENSÃO DE RETORNO LUB8  
 150714: HA CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE LISMS  
 150714: FECHAR DJ727 MODO ANEL  
 150748: RELIAMENTO DO SUCESSO  
 150748: >>> FIM DA RECOMPOSIÇÃO AR\_LUB8 <<<  
 150748: RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO BTA - IO ARE0203  
 150748: RELE 86LIC NÃO ALIADO  
 150748: A TENSÃO EM AR\_LUBTA É 575KV  
 150748: FECHAR O SINCRONIZAR AR\_DJ1072  
 150748: FECHAR DJ1072 MODO SINCRONISMO

O processo de execução é feito de maneira que após uma sugestão de ação ou uma recomendação como a de “SOLICITAR ENVIO DE TENSÃO” o usuário deve seguir pressionando o botão “continuar”. Caso algum problema seja verificado para a continuação, pode-se ir para outra fase com o botão “pular passo”.

FECHAR DJ1072 MODO SINCRONISMO  
 150302: LENDO INFORMAÇÕES DO SNAE  
 150301: TFD RELE BRT NÃO ALIADO - RECOMPOR TFD  
 150301: DEBILITAMENTO NA Média e Baixa Tensão e 230 Desenergizada  
 150301: AFREDO - CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO SAKTSIFETAS  
 150301: RELIAR AR\_DJ782 AR\_DJ1010  
 150301: FECHAR DJ782 MODO ANEL  
 150301: FECHAR DJ1010 MODO ANEL  
 150353: RECOMPOSIÇÃO DO TF 1 - IO ARE03-03  
 150353: FECHAR O DJ752 e O DJ842  
 150353: PRESSIÃO - CONTINUAR -  
 150626: RECOMPOSIÇÃO DO TF 3 - IO ARE04-03  
 150626: FECHAR O DJ712 e O DJ692  
 150626: PRESSIÃO - CONTINUAR -  
 150705: RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO SACS - IO ARE0207  
 150705: AQUIARDE - Gerando nova fase  
 150714: A TENSÃO EM AR\_LUB8 É 1,0KV  
 150714: NÃO HA TENSÃO DE RETORNO LUB8  
 150714: HA CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE LISMS  
 150714: FECHAR DJ727 MODO ANEL  
 150748: RELIAMENTO DO SUCESSO  
 150748: >>> FIM DA RECOMPOSIÇÃO AR\_LUB8 <<<  
 150748: RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO BTA - IO ARE0203  
 150748: RELE 86LIC NÃO ALIADO  
 150748: A TENSÃO EM AR\_LUBTA É 575KV  
 150748: FECHAR O SINCRONIZAR AR\_DJ1072  
 150748: FECHAR DJ1072 MODO SINCRONISMO



## 4.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento do Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão (SART) baseado em um Sistema Especialista (SE) em que a fonte para a representação do conhecimento foram as Instruções Operacionais utilizadas pelos operadores de subestações para a recomposição do sistema de transmissão após um desligamento.

A ferramenta utilizada no desenvolvimento do SE foi o Java Expert System Shell (JESS), escolhido por suas características de sistema portátil e de uso gratuito para instituições de ensino.

A implementação do sistema foi feita para um sistema real aplicado para a subestação de Areia de propriedade da ELETROSUL. A representação das IOs, em nível de componente que deve ser manobrado, no caso disjuntores, levou à construção de 686 regras, o que leva à reflexão de que uma representação deste porte para centros de controle que concentram a operação de várias subestações terá um número expressivo de regras.

A utilização de uma sintaxe de representação do conhecimento próxima daquela encontrada nas IOs foi uma facilidade importante durante os testes e na manutenção da base de conhecimento.

Outro fator importante observado durante este desenvolvimento é o cuidado com o tempo de resposta do sistema, pois no momento da recomposição alguns segundos podem se tornar desconfortáveis ao operador. Então, uma avaliação cuidadosa deve ser considerada durante a fase dos testes que precedem a instalação do sistema em uma subestação, além dos testes de verificação e validação do SE.

Diversos benefícios podem ser obtidos com a utilização deste tipo de sistema de apoio:

- Diminuição do tempo de recomposição, e portanto, da duração da interrupção no fornecimento de energia elétrica;
- Redução da probabilidade de erro humano;
- As respostas do SE servem como auxílio ao operador para validar uma ação de recomposição ou levá-lo a refletir sobre a sua intenção de intervenção no sistema ;

- Auxílio ao operador, também, durante manobras dos circuitos e não apenas durante um blecaute;
- Evitar o congestionamento de comunicação por voz com centros hierarquicamente superiores.

Por fim, cabe lembrar que o sucesso da recomposição não depende exclusivamente do SE, estes sistemas permitem a obtenção de benefícios que podem promover um ambiente confiável ao operador para a execução dos controles restaurativos.

## 5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho de mestrado trata do problema da recomposição de Sistemas de Potência com enfoque em sistemas de transmissão, no contexto atual do setor elétrico brasileiro.

Na atual estrutura do setor elétrico brasileiro é atribuição das empresas de transmissão a execução dos comandos de seus equipamentos para restaurar o Sistema após ocorrências com desligamentos definitivos. Estes comandos são executados por operadores de subestações através de Sistemas Digitais de Supervisão e Controle, instalados em salas de controle na própria subestação, ou em centros de operação que concentram mais de uma subestação. Não é comum estar agregado aos “pacotes” de Sistemas de Supervisão e Controle o fornecimento de ferramentas específicas de auxílio ao operador para serem utilizadas durante a recomposição de sistemas.

Os sistemas de transmissão estão sujeitos a desligamentos que podem variar dos mais simples, de pouca duração e sem perda de carga, até os mais severos blecautes. Nestas situações os operadores de subestações devem recompor o sistema de forma rápida e segura, seguindo um conjunto de instruções que são disponibilizadas em forma de manuais.

A filosofia de recomposição, adotada no Brasil, define que o processo de recomposição seja feito em duas etapas. A primeira chamada de fase fluente e a segunda denominada fase coordenada.

Cabe aos operadores de usinas e subestações de transmissão o início do processo de recomposição, que é feito de modo descentralizado, no qual os operadores possuem autonomia em relação aos centros de operação hierarquicamente superiores para efetuarem os controles necessários à recomposição. Isto representa uma grande responsabilidade depositada nos operadores já que o sucesso da fase fluente e a condução para a fase coordenada dependem da rapidez e da correta intervenção no sistema na fase fluente.



O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um Sistema de Auxílio à Recomposição da Transmissão (SART) para ser utilizado pela operação em tempo real de subestações, durante a fase fluente. Este protótipo foi desenvolvido utilizando-se uma técnica de Inteligência Artificial conhecida como Sistemas Especialistas Baseados em Regras.

A construção do sistema SART seguiu as seguintes premissas:

- Aplicação para a fase fluente de recomposição de subestações de transmissão;
- Representação do conhecimento do especialista em recomposição feita através da utilização das Instruções Operacionais utilizadas pelos operadores;
- Integração ao Sistema de Supervisão e Controle para aquisição das informações topológicas e analógicas necessárias ao processo;
- O Sistema Especialista interage com o operador a cada passo da seqüência de manobras informando qual equipamento deve ser comandado em determinada fase da recomposição.
- Características de portabilidade, permitindo que o sistema seja utilizado independente do Sistema Operacional ou arquitetura de *hardware* do computador.

O protótipo foi desenvolvido a partir das instruções operacionais da subestação de Areia, de propriedade da ELETROSUL. Estas instruções operacionais estão disponíveis em manuais que são elaborados a partir de um conjunto de estudos preliminares com o objetivo de definir procedimentos de recomposição que não violem restrições e coloquem em risco o sucesso da recomposição e/ou a integridade dos equipamentos.

Para sistemas de transmissão estes estudos são feitos utilizando-se ferramentas de processamento numérico para a análise do sistema em regime permanente e de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

Alguns benefícios podem ser encontrados com a utilização deste tipo de sistema de apoio:

- Diminuição do tempo de recomposição, e portanto, da duração da interrupção no fornecimento de energia elétrica;
- Redução da probabilidade de erro humano;
- Auxílio ao operador para validar uma ação de recomposição ou contrapor ao seu conhecimento, permitindo, com isto, que o operador possa refletir sobre sua intervenção no sistema;

- Auxílio ao operador também durante manobras dos circuitos e não apenas durante um blecaute;
- Evitar o congestionamento de comunicação por voz com centros hierarquicamente superiores.

Como a implementação do protótipo inclui a representação do conhecimento da recomposição para um sistema real, foi possível identificar alguns pontos importantes, que devem ser considerados ao se desenvolver SEs para recomposição de subestações de sistemas de transmissão:

- Utilização de uma sintaxe de representação do conhecimento durante o desenvolvimento do SE que seja próxima daquela encontrada nas IOs, com isto obtêm-se facilidades durante os testes e na manutenção da base de conhecimento;
- Definição dos procedimentos de testes para que eles sejam processados quando de uma modificação ou inclusão na base de conhecimento do sistema;
- A representação ao nível de componente pode levar a um grande número de regras, o que quando aplicado a um centro de operação com muitas subestações pode tornar o processo de desenvolvimento e manutenção do Sistema Especialista uma tarefa muito difícil, principalmente se não for utilizada uma estrutura modular na base de regras;
- Portabilidade da ferramenta de desenvolvimento de SE, pois em uma eventual substituição do SSC, pode-se manter o SE sem a necessidade de alterações para um novo SSC, ainda dentro deste quesito, é importante recomendar a utilização de padrões como *Extensible Markup Language (XML)*<sup>16</sup> e *Common Information Model (CIM)*<sup>17</sup>;
- Prover uma interface com o usuário que permita facilidades como o envio de comandos ao SSC diretamente da tela de recomposição;

O sucesso da recomposição não depende exclusivamente do SE, esta ferramenta provê benefícios que podem promover um ambiente confiável ao operador para a execução dos controles restaurativos.

---

<sup>16</sup> *Extensible Markup Language (XML)* é uma padronização de formatos de documentos e estrutura de dados.

<sup>17</sup> *Common Information Model (CIM)* é uma padronização do IEC-61970 voltada para a interface de programas aplicativos usados em sistemas EMS.

Nos sistemas de transmissão recomenda-se que as ações sejam confirmadas pelo operador, mesmo quando enviadas diretamente da janela do SART. Funções de automatização podem ser incorporadas na medida em que respostas confiáveis possam ser obtidas dos sistemas SCADA e dos níveis de testes de verificação e validação e maturação dos Sistemas Especialistas. Para isto, deve-se levar em conta requisitos de confiabilidade dos sistemas SCADA e das respostas providas pelo sistema especialista.

Os resultados deste trabalho apontam para perspectivas de utilização do sistema em subestações de transmissão, podendo também ser utilizado para o treinamento de operadores.

Para o uso em centros de operação, que concentram mais de uma subestação, deve-se avaliar o desempenho do sistema incorporando outras subestações. Esta incorporação deve considerar que as subestações pertencendo a uma mesma área de auto-restabelecimento terão seqüências de operação que hoje são consideradas de modo separado para cada subestação. Assim, ao representar o conhecimento a partir de IOs, é fundamental a presença do especialista em recomposição para definir a seqüência de recomposição dos circuitos de cada subestação.

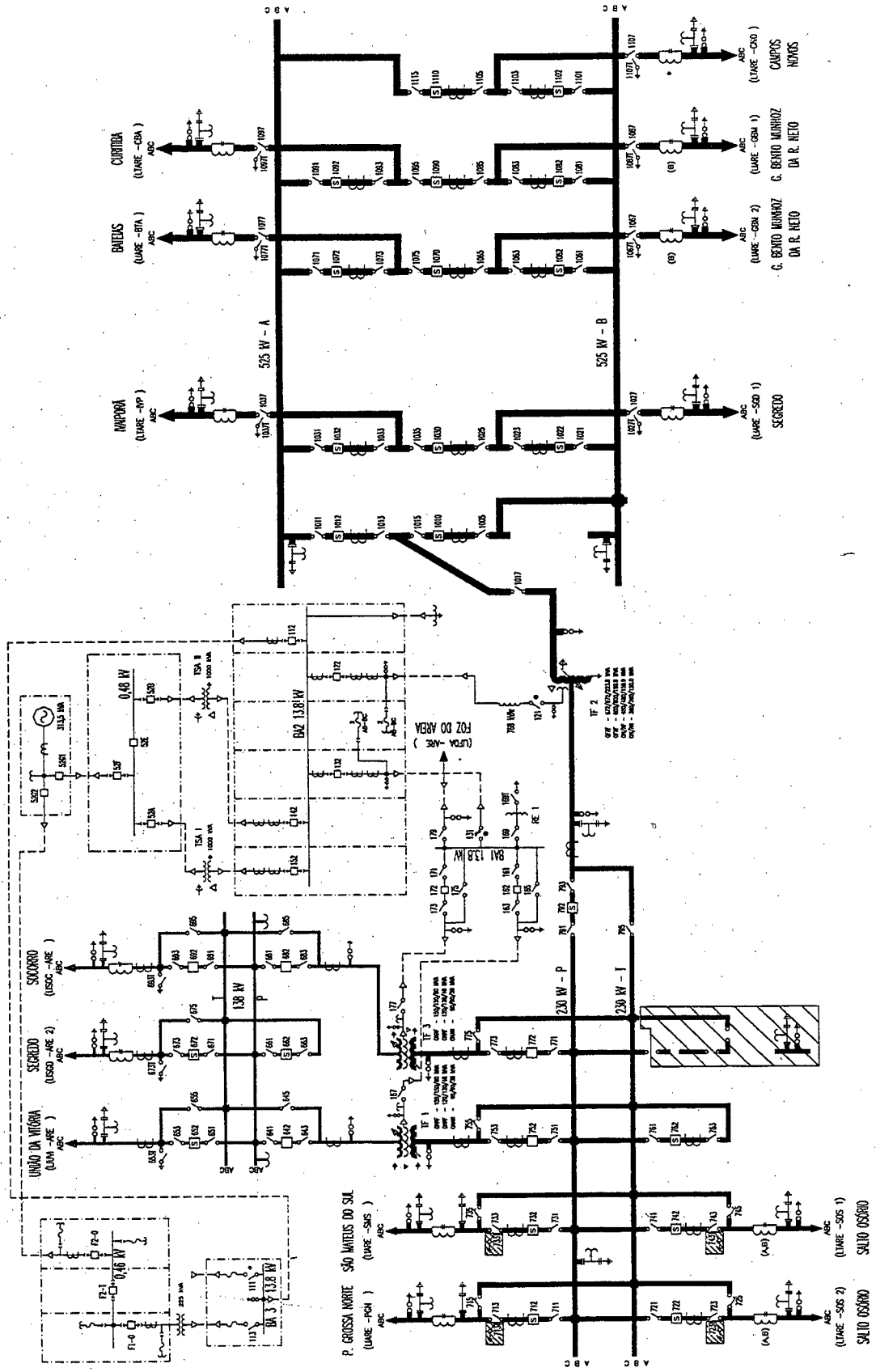
Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

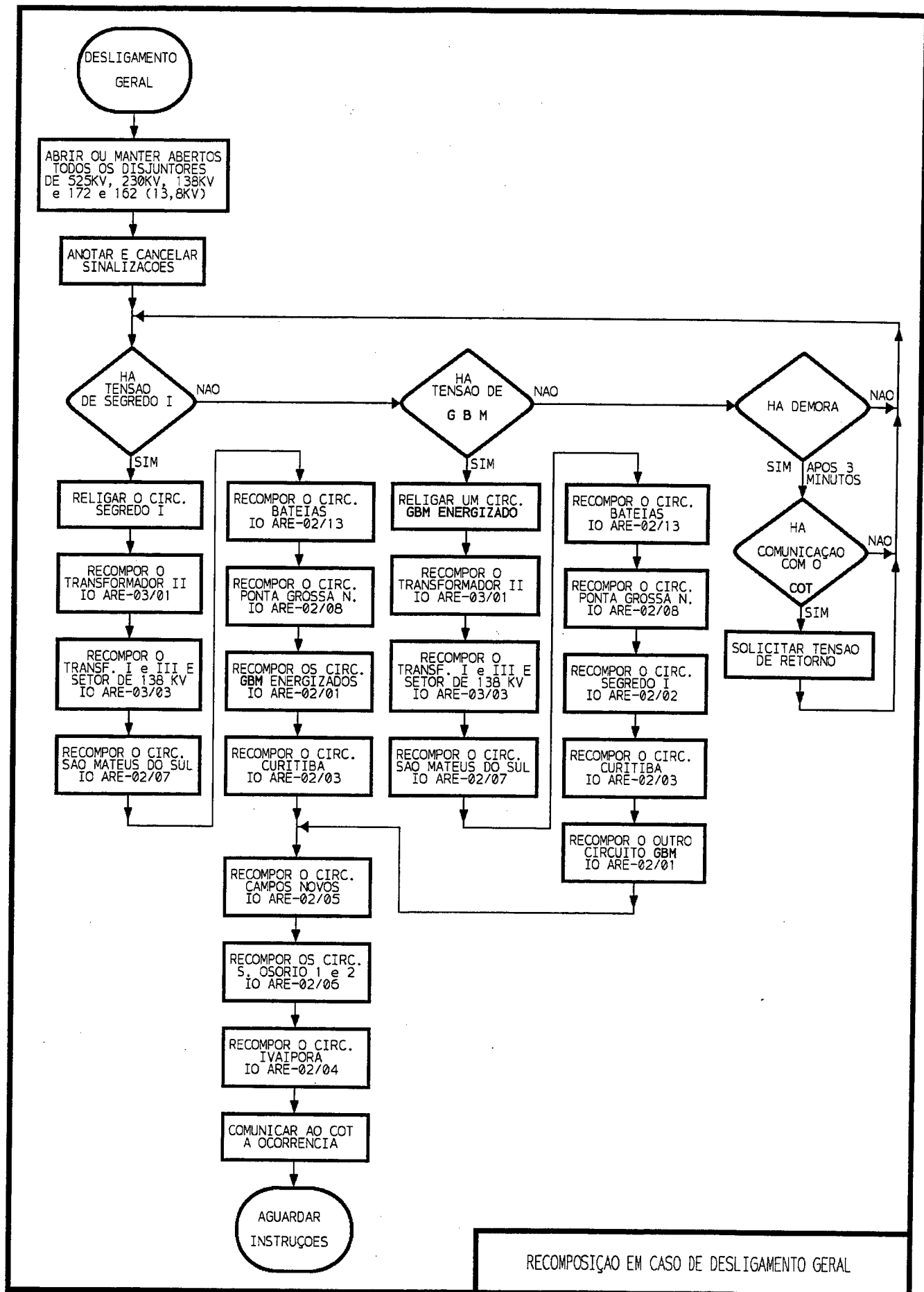
- Desenvolvimento de uma ferramenta para recomposição na fase coordenada utilizando tecnologia de agentes. Cada subestação seria uma unidade autônoma. Depois de concluída a fase fluente cada agente-subestação receberia metas a serem alcançadas a partir de um agente centralizador, o qual coordenaria um conjunto de agentes-subestações, solicitando informações, fazendo avaliações do sistema de potência e recomendando ações;
- Utilização de SE com suporte computacional na fase de estudos e elaboração das IOs. Durante a fase de estudos, o SE estaria integrado às ferramentas de processamento numérico, faria avaliações dos resultados e também seleção dos casos de estudo. Em uma etapa seguinte poder-se-ia habilitar o sistema para a geração automática das IOs em formas de regras para serem utilizadas na base de conhecimento do SE;
- Integração a um *Operator Training System* (OTS) com o intuito de treinamento de treinamento em recomposição;
- Usar os recursos de navegação da *Internet (browser)* para a recomposição. Por exemplo, um operador ao ser deslocado de um centro de operação para uma intervenção


local no sistema, através da *Internet* ou *Intranet*, poderia acessar os resultados vindos do centro, por meio de um navegador, e recompor o sistema do local.

Com este trabalho foi possível verificar as potencialidades na representação do conhecimento contido nas IOs e a complexidade envolvida para o desenvolvimento de um Sistema Especialista.







 <b>ELETROSUL</b>	<b>MANUAL DE OPERAÇÃO DE SISTEMA</b>  <b>INSTRUÇÃO PARA OPERAÇÃO DOS CIRCUITOS</b> <b>GOV. BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO 1 E 2</b> <b>(LIARE -GBM1) e (LIARE -GBM2)</b>	<b>VOLUME II</b>  <b>Nº ARE - 02/01</b>  <b>Página 1 de 6</b>
<b>Emitente: DOS/DVOT</b>		

### 1 - OBJETIVO

Esta instrução define procedimentos para operação dos circuito Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto 1 e 2 a serem observados pelos operadores da SE Areia.

### 2 - MOTIVO DA REVISÃO

Alteração nos procedimentos de recomposição.

### 3 - VIGÊNCIA

Esta instrução entra em vigor a partir do seu recebimento.

### 4 - CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO

**Comprimento aproximado:** circuito 1 : 10,7 km,  
circuito 2 : 10,9 km;

**Tensão nominal:** 525 kV

**Limite contínuo e Fator limitante:** (Relatório DPES/SEACS 016/00)

**circuito 1:** 2400 A TC em ARE e GBM

**circuito 2:** 2400 A TC em GBM

**Potência reativa:** 15 MVar (a vazio e sob tensão nominal)

**Condições de sincronismo:** possui

**Religamento automático:** fora de operação

**Instrumentos de Medição:**

- 3 amperímetros (0 a 900 A)
- 1 wattímetro (-300 a +300 MW)
- 1 varímetro (-300 a +300 Mvar)
- 1 voltímetro (0 a 650 kV)



**Proteção Primária e Alternada**

<b>ATUAÇÃO DE UMA DAS PROTEÇÕES</b>	<b>OCORRÊNCIA</b>
- Defeitos entre fases ( <i>Unblocking</i> , PUTT, 2, 3 e 4 zonas) - Defeitos fase-terra ( <i>Unblocking</i> , PUTT, 2, 3 e 4 zonas)	Desliga Disjuntores 1082 e 1090 e/ou 1062 e 1070
- Falha do disjuntor 1082 - circuito LIARE -GBM 1	Desliga e Bloqueia DJs.1090, 1102, 1062 1022, 1010 e envia Canal C para GBM
- Falha do disjuntor 1090 - circuito LIARE -GBM 1	Desliga e Bloqueia DJs.1092 e 1082, envia canal C para GBM e Curitiba
- Falha do disjuntor 1062 - circuito LIARE -GBM 2	Desliga e Bloqueia DJs.1070, 1102, 1082 1022, 1010 e envia Canal C para GBM
- Falha do disjuntor 1070 - circuito LIARE -GBM 2	Desliga e Bloqueia DJs.1072 e 1062, envia canal C para GBM e Bateias
- Recepção de Canal C da GBM - com Bloqueio - circuito LIARE -GBM 1 (86L2C)	Desliga e Bloqueia DJs. 1082, 1090
- Recepção de Canal C da GBM - com Bloqueio - circuito LIARE -GBM 2 (86L2C)	Desliga e Bloqueia DJs. 1062, 1070

**5 - CONDIÇÕES PARA A RECOMPOSIÇÃO**

A recomposição de qualquer dos circuitos Gov. Bento Munhoz só poderá ser efetuada se as condições abaixo relacionadas estiverem satisfeitas, caso contrário, comunicar ao COT e aguardar instruções.

- 5.1 - Não poderá ter atuado o relé de bloqueio 86L2C;
- 5.2 - O circuito GBM 1 só poderá ser recomposto se o esquema especial de corte de geração (para o circuito GBM 1) estiver desligado ou se o circuito Ivaiporã estiver com carga ativa;
- 5.3 - O circuito GBM 2 só poderá ser recomposto se o esquema especial de corte de geração (para o circuito GBM 2) estiver desligado ou se o circuito Ivaiporã estiver com carga ativa.

**6 - PROCEDIMENTOS EM CASO DE DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DO CIRCUITO GBM 1**

<b>6.1</b> Estando satisfeitas as condições para a recomposição	<b>6.1.1</b> Com tensão de retorno  - fechar ou sincronizar o disjuntor do circuito, DJ1082, conforme IO ARE-04/02	<b>6.1.1.1</b> Circuito CURITIBA energizado ou isolado  - fechar ou sincronizar o DJ 1090 (central), conforme IO ARE-04/02	<b>6.1.1.2</b> Circuito CURITIBA desenergizado sem estar isolado  - manter o disjuntor DJ1090 (central), aberto  - comunicar a ocorrência ao COT
	<b>6.1.2</b> Sem tensão de retorno  - aguardar tensão de retorno	<b>6.1.2.1</b> Após restabelecida a tensão de retorno  - proceder conforme item 6.1.1	<b>6.1.2.2</b> Há demora superior a 3 minutos para restabelecer tensão de retorno  - solicitar ao COT envio de tensão de retorno e proceder conforme 6.1.2
<b>6.2</b> Não estando satisfeitas as condições para a recomposição	- comunicar a ocorrência ao COT		

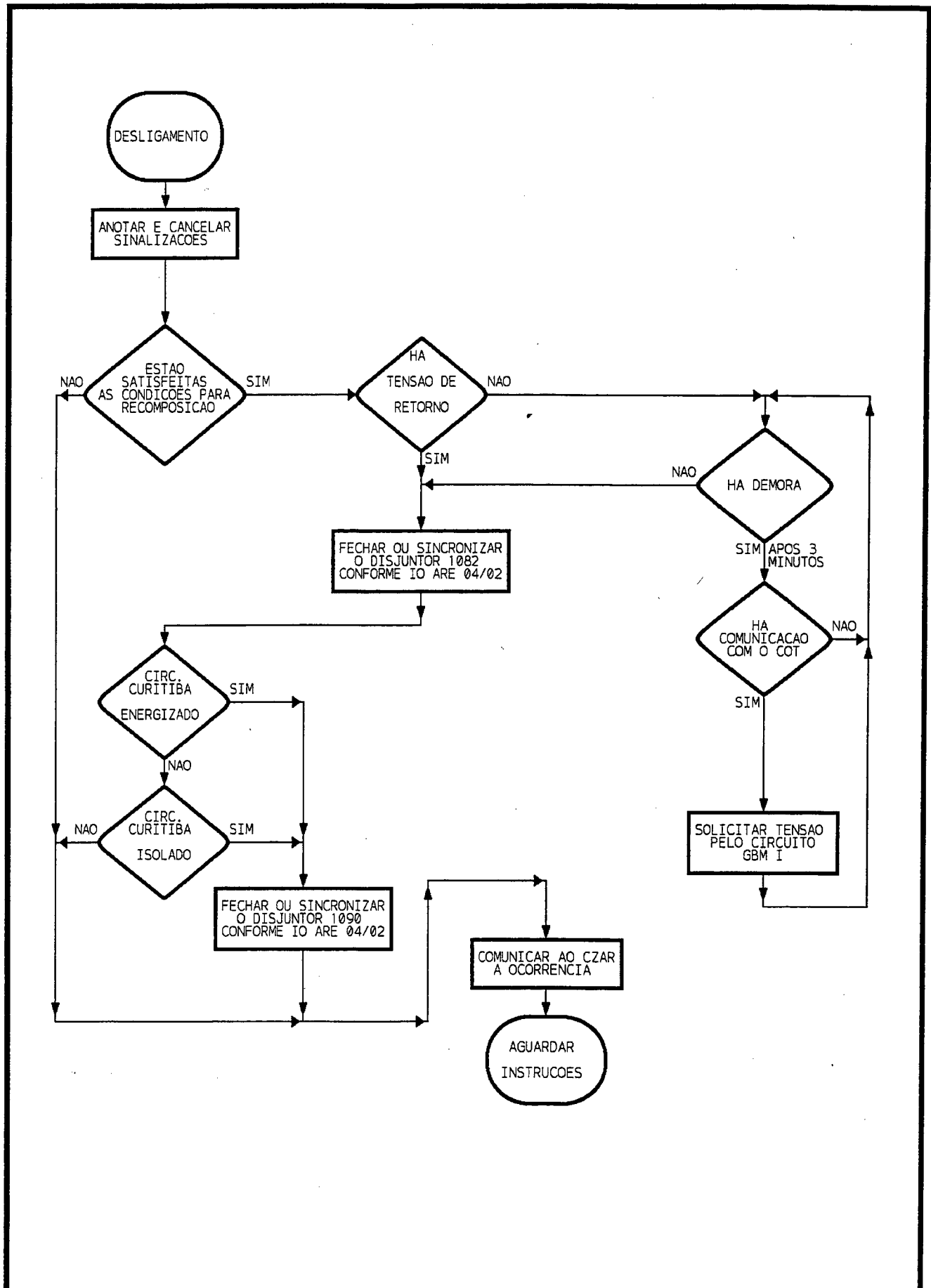
**7 - PROCEDIMENTOS EM CASO DE DESLIGAMENTO AUTOMÁTICO DO CIRCUITO GBM 2**

7.1 Estando satisfeitas as condições para a recomposição	7.1.1 Com tensão de retorno  - fechar ou sincronizar o disjuntor do circuito, DJ1062, conforme IO ARE-04/02	7.1.1.1 Circuito BATEIAS energizado ou isolado  - fechar ou sincronizar o DJ 1070 (central), conforme IO ARE-04/02	7.1.1.2 Circuito BATEIAS desenergizado sem estar isolado  - manter o disjuntor DJ1070 (central), aberto  - comunicar a ocorrência ao COT
	7.1.2 Sem tensão de retorno  - aguardar tensão de retorno	7.1.2.1 Após restabelecida a tensão de retorno  - proceder conforme item 7.1.1	7.1.2.2 Há demora superior a 3 minutos para restabelecer tensão de retorno  - solicitar ao COT envio de tensão de retorno e proceder conforme 7.1.2
7.2 Não estando satisfeitas as condições para a recomposição	- comunicar a ocorrência ao COT		

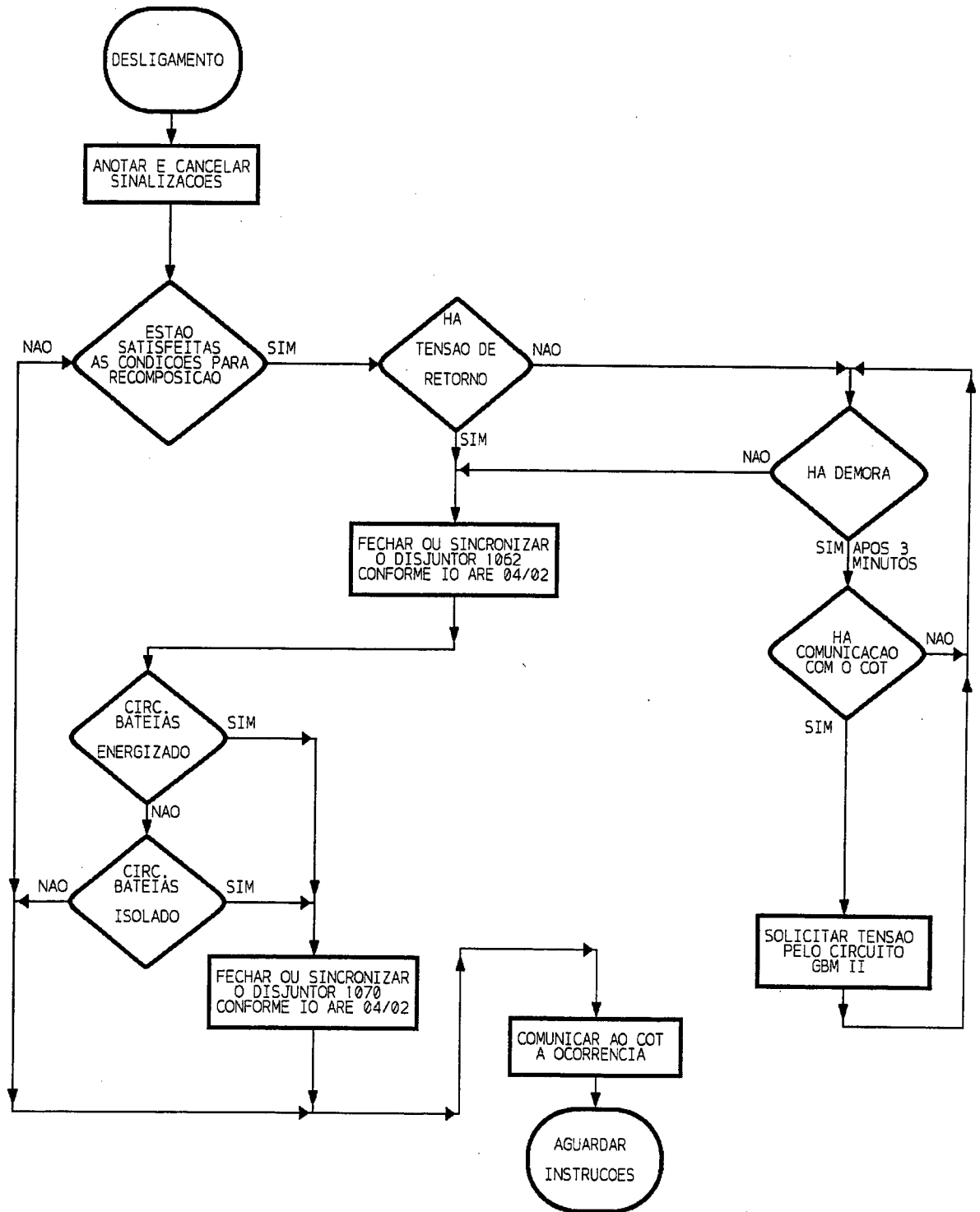
**8 - ANEXOS**

**Anexo 1** - Fluxograma da Recomposição do Circuito Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto I

**Anexo 2** - Fluxograma da Recomposição do Circuito Gov. Bento Munhoz da Rocha Netto II



FLUXOGRAMA DA RECOMPOSICAO DO CIRCUITO GOV. BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO I



FLUXOGRAMA DA RECOMPOSICAO DO CIRCUITO GOV. BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETTO II

```

; PROGRAMA DE SIMULACAO
; CTARE / SE AREIA

; Inicializacao das TAC's

#
# PCT 10 0           ; atraso resposta controle e' 10 seg
# PER 60            ; periodicidade da integr e' de 60 seg
#

> LGO AR_TAC       ;
> LGO AR_FIL       ;
> LGO AR_SDE       ;
> LGO CTARE_CALC   ; lig TACs operacionais
> LGO ZCALC        ;
#
> INT dig AR_TAC   ;
> INT dig AR_FIL   ;
> INT dig AR_SDE   ;
> INT dig CTARE_CALC ; faz inicial de pontos dig
#
> INT med AR_TAC   ;
> INT med AR_FIL   ;
> INT med AR_SDE   ;
> INT med CTARE_CALC ; faz inicial de pontos ana
> INT med ZCALC    ;

> ESP 2

> VAR dig AR_DJ1010_DJBL VAL 0 ;
> VAR dig AR_DJ1010_DJDX VAL 0 ;
> VAR dig AR_DJ1012_DJBL VAL 0 ;
> VAR dig AR_DJ1012_DJDX VAL 0 ;

> VAR dig AR_DJ1010_DJBL VAL 1 ;
> VAR dig AR_DJ1010_DJDX VAL 1 ;
> VAR dig AR_DJ1012_DJBL VAL 1 ;
> VAR dig AR_DJ1012_DJDX VAL 1 ;

> VAR dig AR_TF01_230_TFBL VAL 1 ;
> VAR dig AR_TF02_525_TFBL VAL 1 ;
> VAR dig AR_TF03_230_TFBL VAL 1 ;

> VAR dig AR_BAA_525_RBLO VAL 0 ;
> VAR dig AR_BAB_525_RBLO VAL 0 ;
> VAR dig AR_BAP_230_RBLO VAL 0 ;

> VAR med AR_BAA_525_KV VAL 250.00 ;
> VAR med AR_BAB_525_KV VAL 250.00 ;
> VAR med AR_BAP_138_KV VAL 250.00 ;
> VAR med AR_BAP_230_KV VAL 250.00 ;
> VAR med AR_BAT_230_AMP VAL 250.00 ;
> VAR med AR_BAT_230_MVAR VAL 250.00 ;
> VAR med AR_BAT_230_MW VAL 250.00 ;
> VAR med AR_LIBTA_MVAR VAL 250.00 ;
> VAR med AR_LIBTA_MW VAL 250.00 ;
> VAR med AR_LIGBM1_MVAR VAL 250.00 ;
> VAR med AR_LIGBM1_MW VAL 250.00 ;
> VAR med AR_LIGBM2_MVAR VAL 250.00 ;

```

```

-----
;
; Modulo : ARE-02/01
;   Intruções de Operação dos Circuitos
;   GBM 1 e 2
;
-----

```

```

;
;   CIRCUITO GBM1
;
-----

```

```
(defrule ARE02-01-GBM1::IO-ARE02-01
```

```
=>
```

```
(bind ?msg-operador "RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO GBM I - IO ARE02/01")
```

```
(printout t ?msg-operador crlf)
```

```
(assert (fase condicoes-de-recomposicao-GBM1)))
```

```
(defrule ARE02-01-GBM1::x_1-ver-condicoes-de-recomposicao
```

```
?fase <- (fase condicoes-de-recomposicao-GBM1)
```

```
(RELE (id 86L2C) (estado NATUADO))
```

```
(or (CORTE_GERACAO (id ARE_LIGBM1) (estado DESLIG))
```

```
(LT (id ARE_LTIVP) (kV ?valor&:(> ?valor 0))))
```

```
=>
```

```
(retract ?fase)
```

```
(bind ?msg-operador "HÁ CONDIÇÕES DE RECOMPOSIÇÃO DE GBM1")
```

```
(printout t ?msg-operador crlf)
```

```
(assert (fase verific-tensao-retorno-GBM1)))
```

```
(defrule ARE02-01-GBM1::x_2-sem-condicoes-de-recomposicao
```

```
?fase <- (fase condicoes-de-recomposicao-GBM1)
```

```
(or (RELE (id 86L2C) (estado ATUADO))
```

```
(and (CORTE_GERACAO (id ARE_LIGBM1) (estado LIG))
```

```
(LT (id ARE_LTIVP) (MW ?w-LTIVP &:(<= ?w-LTIVP 0))))))
```

```
=>
```

```
(retract ?fase)
```

```
(bind ?msg-operador "NÃO HÁ CONDIÇÕES DE RECOMPOSIÇÃO DE GBM1")
```

```
(printout t ?msg-operador crlf)
```

```
(assert (fase msg-fim-circuito))
```

```
(focus COMUNICA-COT))
```

```
(defrule ARE02-01-GBM1::611-ha-tensao-retorno
```

```
?fase <- (fase verific-tensao-retorno-GBM1)
```

```
(LT(id ARE_LIGBM1) (kV ?t-LIGBM1&:(>= ?t-LIGBM1 400)))
```

```
=>
```

```
(retract ?fase)
```

```
(bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LIGBM1 É: ")
```

```
(printout t ?msg-operador ?t-LIGBM1 "kV" crlf)
```

```
(bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1082")
```

```
(printout t ?msg-operador crlf)
```

```
(focus ARE04-02-DJ1082)
```

```
(assert (fase ver-circ-curitiba)))
```

```
(defrule ARE02-01-GBM1::612-n-ha-tensao-retorno
```

```
?fase <- (fase verific-tensao-retorno-GBM1)
```

```
(LT(id ARE_LIGBM1) (kV ?t-LIGBM1 &:(< ?t-LIGBM1 400)))
```

```
=>
```

```
(retract ?fase)
```

```
(bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LIGBM1 É: ")
```

```
(printout t ?msg-operador ?t-LIGBM1 "kV" crlf)
```

```
(bind ?msg-operador "NÃO HÁ TENSÃO DE RETORNO EM LIGBM1")
```

```
(printout t ?msg-operador crlf)
```

```
(focus SOLICITA-ENVIO-TENSAO))
```

```

(defrule ARE02-01-GBM1::6111-LTCBA-energizado
  ?fase <- (fase ver-circ-curitiba)
  (DJ(id ARE_DJ1082) (estado FECHADO))
  (LT(id ARE_LTCBA) (kV ?t-LTCBA &:(>= ?t-LTCBA 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "1-FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1090")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1090)
  (assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-01-GBM1::6111-LTCBA-isolado
  ?fase <- (fase ver-circ-curitiba)
  (DJ(id ARE_DJ1082) (estado ABERTO))
  (DJ(id ARE_DJ1092) (estado ABERTO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "2-FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1090")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1090)
  (assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-01-GBM1::6112-LTCBA-nenerg-e-nisolado
  ?fase <- (fase ver-circ-curitiba)
  (LT(id ARE_LTCBA) (kV ?t-LTCBA &:(< ?t-LTCBA 10)))
  (or(DJ(id ARE_DJ1082) (estado FECHADO))
    (DJ(id ARE_DJ1092) (estado FECHADO)))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "CIRCUITO LTCBA NAO ENERGIZADO E NAO ISOLADO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (bind ?msg-operador "MANTER ARE_DJ1090 ABERTO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-01-GBM1::x_FIM-msg-FIM-recomposicao
  ?fase <- (fase msg-fim-circuito)
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador ">>> FIM DA RECOMPOSIÇÃO ARE_LIGBM1 <<<")
  (printout t ?msg-operador crlf))

;-----
;          CIRCUITO GBM2
;-----

(defrule ARE02-01-GBM2::IO-ARE02-01
  =>
  (bind ?msg-operador "RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO GBM II - IO ARE02/01")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase condicoes-de-recomposicao-GBM2)))

(defrule ARE02-01-GBM2::x_1-ver-condicoes-de-recomposicao
  ?fase <- (fase condicoes-de-recomposicao-GBM2)
  (RELE (id 86L2C) (estado NATUADO))
  (or (CORTE_GERACAO (id ARE_LIGBM2) (estado DESLIG))
    (LT (id ARE_LTIVP) (MW ?w-LTIVP&:(> ?w-LTIVP 0))))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "HÁ CONDIÇÕES DE RECOMPOSIÇÃO DE GBM2")
  (printout t ?msg-operador crlf))

```



```

(assert (fase verific-tensao-retorno-GBM2)))

(defrule ARE02-01-GBM2::x_2-sem-condicoes-de-recomposicao
  ?fase <- (fase condicoes-de-recomposicao-GBM2)
  (or (RELE (id 86L2C) (estado ATUADO))
  (and (CORTE_GERACAO (id ARE_LIGBM2) (estado LIG))
  (LT (id ARE_LTIVP) (MW ?w-LTIVP &:(<= ?w-LTIVP 0))))))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "NÃO HÁ CONDIÇÕES DE RECOMPOSIÇÃO DE GBM2")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito))
  (focus COMUNICA-COT))

(defrule ARE02-01-GBM2::711-ha-tensao-retorno
  ?fase <- (fase verific-tensao-retorno-GBM2)
  (LT (id ARE_LIGBM2) (kV ?t-LIGBM2 &:(>= ?t-LIGBM2 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LIGBM2 É: ")
  (printout t ?msg-operador ?t-LIGBM2 "kV" crlf)
  (bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1062")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1062)
  (assert (fase ver-circ-bateias)))

(defrule ARE02-01-GBM2::712-n-ha-tensao-retorno
  ?fase <- (fase verific-tensao-retorno-GBM2)
  (LT (id ARE_LIGBM2) (kV ?t-LIGBM2 &:(< ?t-LIGBM2 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LIGBM2 É: ")
  (printout t ?msg-operador ?t-LIGBM2 "kV" crlf)
  (bind ?msg-operador "NÃO HÁ TENSÃO DE RETORNO EM LIGBM2")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus SOLICITA-ENVIO-TENSAO))

(defrule ARE02-01-GBM2::7111-LTBAT-energizado
  ?fase <- (fase ver-circ-bateias)
  (DJ (id ARE_DJ1062) (estado FECHADO))
  (LT (id ARE_LTBAT) (kV ?t-LTBAT &:(>= ?t-LTBAT 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1070")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1070)
  (assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-01-GBM2::7111-LTBAT-isolado
  ?fase <- (fase ver-circ-bateias)
  (DJ (id ARE_DJ1062) (estado ABERTO))
  (DJ (id ARE_DJ1072) (estado ABERTO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1070")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1070)
  (assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-01-GBM2::7112-LTBAT-nenerg-e-nisolado
  ?fase <- (fase ver-circ-bateias)

```

```

(LT(id ARE_LTBAT) (kV ?t-LTBAT &:(< ?t-LTBAT 10)))
(or(DJ(id ARE_DJ1062) (estado FECHADO))
 (DJ(id ARE_DJ1072) (estado FECHADO)))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "CIRCUITO LTBAT NAO ENERGIZADO E NAO ISOLADO")
(printout t ?msg-operador crlf)
(bind ?msg-operador "MANTER ARE_DJ1070 ABERTO")
(printout t ?msg-operador crlf)
(assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-01-GBM2::xFIM-msg-FIM-recomposicao
?fase <- (fase msg-fim-circuito)
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador ">>> FIM DA RECOMPOSIÇÃO ARE_LIGBM2 <<<")
(printout t ?msg-operador crlf))

;-----
; Modulo : ARE-02/02
;      Intruções de Operação do Circuito SGD 1
;-----

(defrule ARE02-02::IO-ARE02-02
=>
(bind ?msg-operador "RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO SGD 1 - IO ARE02/02")
(printout t ?msg-operador crlf)
(assert (fase verific-condicao-recomposicao)))

(defrule ARE02-02::5-rele-atuado
?fase <- (fase verific-condicao-recomposicao)
(RELE (id 86L1C) (estado ATUADO))
=>
(bind ?msg-operador "RELÈ 86L1C ATUADO")
(printout t ?msg-operador crlf)
(assert (fase msg-fim-circuito))
(focus COMUNICA-COT))

(defrule ARE02-02::51-ha-tensao-retorno
?fase <- (fase verific-condicao-recomposicao)
(LT(id ARE_LISGD1) (kV ?t-LISGD1 &:(>= ?t-LISGD1 400)))
(RELE (id 86L1C) (estado NATUADO))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LISGD1 É: ")
(printout t ?msg-operador ?t-LISGD1 "kV" crlf)
(bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1022")
(printout t ?msg-operador crlf)
(focus ARE04-02-DJ1022)
(bind ?msg-operador "MANTER MODULO ARE_DJ1030 ABERTO")
(printout t ?msg-operador crlf)
(assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-02::52-nha-tensao-retorno
?fase <- (fase verific-condicao-recomposicao)
(LT(id ARE_LISGD1) (kV ?t-LISGD1 &:(< ?t-LISGD1 400)))
(RELE (id 86L1C) (estado NATUADO))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LISGD1 É: ")

```

```
(printout t ?msg-operador ?t-LISGD1 "kV" crlf)
(bind ?msg-operador "NÃO HÁ TENSÃO DE RETORNO EM LISGD1")
(printout t ?msg-operador crlf)
(focus SOLICITA-ENVIO-TENSAO)
(assert (fase msg-fim-circuito)))
```

```
(defrule ARE02-02::xFIM-msg-FIM-recomposicao
  ?fase <- (fase msg-fim-circuito)
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador ">>> FIM DA RECOMPOSIÇÃO ARE_LISGD1 <<<")
  (printout t ?msg-operador crlf))
```

```
;-----
; Modulo : ARE-02/03
;      Intruções de Operação do Circuito
;      Curitiba (LTARE-CBA)
;-----
```

```
(defrule ARE02-03::IO-ARE02-03
  =>
  (bind ?msg-operador "RECOMPOSIÇÃO DO CIRCUITO CBA - IO ARE02/03")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase condicoes-de-recomposicao-CBA)))
```

```
(defrule ARE02-03::6x-rele-atuado
  ?fase <- (fase condicoes-de-recomposicao-CBA)
  (RELE (id 86L1C) (estado ATUADO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "RELE 86L1C ATUADO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito))
  (focus COMUNICA-COT))
```

```
(defrule ARE02-03::6x-rele-natuado
  ?fase <- (fase condicoes-de-recomposicao-CBA)
  (RELE (id 86L1C) (estado NATUADO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "RELE 86L1C NAO atuado")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase verific-tensao-retorno)))
```

```
;-----
; Com tensão de retorno - 6.2
;-----
```

```
(defrule ARE02-03::62-ha-tensao-retorno
  ?fase <- (fase verific-tensao-retorno)
  (LT(id ARE_LTCBA) (kV ?t-LTCBA &:(>= ?t-LTCBA 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LTCBA É: ")
  (printout t ?msg-operador ?t-LTCBA "kV" crlf)
  (bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1092")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1092)
  (assert (fase ver-circuito-gbm1)))
```

```
(defrule ARE02-03::621-LTGBM1-energizado
```

```

?fase <- (fase ver-circ-gbm1)
(DJ(id ARE_DJ1092) (estado FECHADO))
(LT(id ARE_LTGBM1) (kV ?t-LTGBM1 &:(>= ?t-LTGBM1 400)))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1090")
(printout t ?msg-operador crlf)
(focus ARE04-02-DJ1090)
(assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-03::621-LTGBM1-isolado
?fase <- (fase ver-circ-gbm1)
(DJ(id ARE_DJ1082) (estado ABERTO))
(DJ(id ARE_DJ1092) (estado ABERTO))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "FECHAR OU SINCRONIZAR ARE_DJ1090")
(printout t ?msg-operador crlf)
(focus ARE04-02-DJ1090)
(assert (fase msg-fim-circuito)))

(defrule ARE02-03::622-LTGBM1-nenerg-e-nisolado
?fase <- (fase ver-circ-gbm1)
(LT(id ARE_LTGBM1) (kV ?t-LTGBM1 &:(< ?t-LTGBM1 10)))
(or(DJ(id ARE_DJ1082) (estado FECHADO))
(DJ(id ARE_DJ1092) (estado FECHADO)))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "CIRCUITO LTGBM1 NAO ENERGIZADO E NAO ISOLADO")
(printout t ?msg-operador crlf)
(bind ?msg-operador "MANTER ARE_DJ1090 ABERTO")
(printout t ?msg-operador crlf)
(assert (fase msg-fim-circuito)))

;-----
;Sem tensão de retorno - 6.3
;-----
(defrule ARE02-03::63-n-ha-tensao-retorno
?fase <- (fase verif-tensao-retorno)
(LT(id ARE_LTCBA) (kV ?t-LTCBA &:(< ?t-LTCBA 400)))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "A TENSÃO EM ARE_LTCBA É: ")
(printout t ?msg-operador ?t-LTCBA "kV" crlf)
(bind ?msg-operador "NÃO HÁ TENSÃO DE RETORNO EM LTCBA")
(printout t ?msg-operador crlf)
(assert (fase verif-cond-energ)))

(defrule ARE02-03::631-ha-condic-energização
?fase <- (fase verif-cond-energ)
(BA (id ARE_BAA525) (Hz 60))
(LT (id ARE_LISGD1) (MW ?w-LISGD1&:(> ?w-LISGD1 0)))
(LT (id ARE_LTBTA) (MW ?w-LTBTA&:(> ?w-LTBTA 0)))
(or (BA (id ARE_BAA525) (kV ?t-BAA&:(>= ?t-BAA 400)))
(BA (id ARE_BAB525) (kV ?t-BAB&:(>= ?t-BAB 400)))
(or (LT (id ARE_LIGBM1) (MW ?w-LIGBM1&:(> ?w-LIGBM1 0)))
(LT (id ARE_LIGBM2) (MW ?w-LIGBM2&:(> ?w-LIGBM2 0))))
=>
(retract ?fase)
(bind ?msg-operador "HÁ CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE LTCBA")
(printout t ?msg-operador crlf)

```

```
(assert (fase verif-barra-B)))

(defrule ARE02-03::6311-com-tensão-barra-dj-disp
  ?fase <- (fase verif-barra-B)
  (BA (id ARE_BAA525) (kV ?t-BAA&:(>= ?t-BAA 400)))
  (DJ (id ARE_DJ1092) (estado ABERTO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "BAA525 ENERGIZADA")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1092)
  (assert (fase ver-relig-DJ1092)))

(defrule ARE02-03::6311a-relig-sucesso
  ?fase <- (fase ver-relig-DJ1092)
  (DJ(id ARE_DJ1092) (estado FECHADO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "RELIGAMENTO C/ SUCESSO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (focus ARE04-02-DJ1090)
  (assert (fase ver-relig-DJ1090)))

(defrule ARE02-03::6311b-relig-sem-sucesso
  ?fase <- (fase ver-relig-DJ1092)
  (DJ(id ARE_DJ1092) (estado ABERTO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "RELIGAMENTO SEM SUCESSO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito))
  (focus COMUNICA-COT))

(defrule ARE02-03::6312-com-tensão-na-barra-dj-indisp
  ?fase <- (fase verif-barra-B)
  (BA (id ARE_BAA525) (kV ?t-BAA&:(>= ?t-BAA 400)))
  (DJ (id ARE_DJ1092) (estado BLOQUEADO))
  =>
  (bind ?msg-operador "ARE_DJ1092 INDISPONIVEL")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (retract ?fase)
  (focus ARE04-02-DJ1090)
  (assert (fase ver-relig-DJ1090)))

(defrule ARE02-03::6312-sem-tensão-na-barra
  ?fase <- (fase verif-barra-B)
  (BA (id ARE_BAA525) (kV ?t-BAA&:(< ?t-BAA 400)))
  =>
  (retract ?fase)
  (focus ARE04-02-DJ1090)
  (assert (fase ver-relig-DJ1090)))

(defrule ARE02-03::6312a-relig-sucesso
  ?fase <- (fase ver-relig-DJ1090)
  (DJ(id ARE_DJ1090) (estado FECHADO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "ARE_DJ1090-RELIGAMENTO C/ SUCESSO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito)))
```

```
(defrule ARE02-03::6312b-relig-sem-sucesso
  ?fase <- (fase ver-relig-DJ1090)
  (DJ(id ARE_DJ1090) (estado ABERTO))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "ARE_DJ1090-RELIGAMENTO SEM SUCESSO")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito))
  (focus COMUNICA-COT))

(defrule ARE02-03::632-n-ha-condic-energizacão
  ?fase <- (fase verif-cond-energ)
  (or (BA (id ARE_BAA525) (kV ?f-BAA&:(< ?f-BAA 60)))
      (or (LT (id ARE_LISGD1) (kV ?w-LISGD1&:(<= ?w-LISGD1 0)))
          (or (LT (id ARE_LTBTA) (kV ?w-LTBTA&:(<= ?w-LTBTA 0)))
              (or (and (LT (id ARE_LIGBM1) (kV ?w-LIGBM1&:(<= ?w-LIGBM1 0)))
                      (LT (id ARE_LIGBM2) (kV ?w-LIGBM2&:(<= ?w-LIGBM2 0))))
                  (and (BA (id ARE_BAA525) (kV ?t-BAA&:(< ?t-BAA 400)))
                      (BA (id ARE_BAB525) (kV ?t-BAB&:(< ?t-BAB 400))))))))
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador "CONDIÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DE LTCBA NÃO SATISFEITAS")
  (printout t ?msg-operador crlf)
  (assert (fase msg-fim-circuito))
  (focus COMUNICA-COT))

(defrule ARE02-03::xFIM-msg-FIM-recomposicao
  ?fase <- (fase msg-fim-circuito)
  =>
  (retract ?fase)
  (bind ?msg-operador ">>> FIM DA RECOMPOSIÇÃO ARE LTCBA <<<")
  (printout t ?msg-operador crlf))
```

## REFERÊNCIAS

- ADIBI, M. M.; CLELLAND, P.; FINK, L. et. al.; 1987a. Power System Restoration – A Task Force Report, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 2, n. 2 (May), p. 271-277.
- ADIBI, M. M.; BORKOSKI, J. N.; KAFKA, R. J.; 1987b. Power System Restoration – The Second Task Force Report, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.2, n. 4 (Nov.), p. 927-933.
- ADIBI, M. M.; FINK, L. H.; ANDREWS C. J.; 1992. Special Considerations in Power System Restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 7, n. 4 (Nov.) , p. 1419-1427.
- ADIBI, M. M.; FINK L. H.; 1994a. Power System Restoration Planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 1 (Feb.) , p. 22-28.
- ADIBI, M. M.; KAFKA, R. J.; MILIANICZ, D. P.; 1994b. Expert System Requirements for Power System Restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 3 (Aug.) , p. 1592-1600.
- ADIBI, M. M.; BORKOSKI, J. N.; KAFKA, R. J.; 1994c. Analytical Tool Requirements for Power System Restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.9, n. 3 (Aug.), p. 1582-1591.
- ADIBI, M. M., ANCONA, J.; FINK, L. H.; KAFKA, R. J. et al.; 2000. *Power System Restoration: Methodologies & Implementation Strategies*, EUA :IEEE Press,.
- ALMEIDA, P. C.; STEINBERGER, J. M.; FERNANDEZ, P. C. et. al.; 1995. Estudos para Validação dos Procedimentos da Nova Filosofia de Recomposição do GCOI – Detalhamento dos Estudos e Exemplificação para a Área Rio de Janeiro. In: ENCONTRO PARA DEBATES E ASSUNTOS DA OPERAÇÃO (5.: Dez. 1995 : Foz do Iguaçu, Paraná). *Anais*. Foz do Iguaçu. p. 62-79.
- ANCONA, J. J.; 1995. A Framework For System Restoration Following a Major Power Failure, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.10, n. 3 (Aug.), p. 1480-1485.
- AZEVEDO, G. P.; OLIVEIRA, A. L. F.; 2001. Control Centers with Open Architecture, *IEEE Computer Applications in Power*, New York, (Oct.), p. 27-32.

- BALU, N. J.; ADAPA R.; CAULEY G. et al.; 1992. Review of Expert Systems in Bulk Power System and Operation, *Proceedings of the IEEE*, New York, v.80, n. 5 (May), p. 727-731.
- BARBOSA, A.; 2002. Aneel prevê que capacidade de geração crescerá 50% em 5 anos, *Estado de São Paulo*. São Paulo, 2 fev.
- BERNARDO, Luiz Antonio Masselli; 2000. *Sistema Inteligente de Apoio ao Restabelecimento de Sistema Elétrico na Fase Fluente*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- BILLI, M.; 2002. Cabo se rompe e apagão corta luz de 10 Estados, *Folha de São Paulo*. São Paulo, 22 jan.
- BITTENCOURT G.; 1998. *Inteligência Artificial Ferramentas e Teorias*. 1. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC.
- COSTA, Augusto Cesar Pinto Loureiro da; 1997. *Expert-Coop Um Ambiente para Desenvolvimento de Sistemas Multi-Agentes Cognitivos*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- FALCÃO, D. M.; MELO, A. C. G.; SILVA, A. P. A.; et. al.; 1998. Intelligent Systems Applications to Power Systems in Brazil: Present Status and Perspectives. In: VI SEPOP. Salvador, Bahia, Maio. 1998.
- FINK, L. H.; LIU, K. L.; LIU, C. C.; 1995. From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.10, n. 2 (May), p. 745-752.
- FLORES, P. H.; ANDRADE, L. F. B.; SARTOR, A. F.; et. al.; 1999. Experiência da ELETROSUL na Implantação de um Centro de Telecontrole de Subestações de Transmissão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SNPTEE ( 15.: 1999: Paraná, Foz do Iguazu). *Anais*. p. 1- 6.
- FRIEDMAN-HILL E. J.; 2001. *Jess, The Expert System Shell for the Java Platform*. v.6.0b1. EUA:Livermore,CA. <http://herzberg.ca.sandia.gov/jess> .



- GCOI - GRUPO COORDENADOR PARA OPERAÇÃO INTERLIGADA; 1998. *Filosofia de Recomposição do Sistema Sul/Sudeste/Centro-Oeste*. 1998
- GIARRATANO, J. C.; RILEY, G.; 1998. *Expert Systems Principles and Programming*. 3. ed. EUA: PWS Publishing Company.
- GOMES, P.; LIMA, J.W.M.; SCHILLING M. T.; 2002. Estratégias para Aumento da Segurança da Malha Elétrica: Lições Extraídas dos Grandes Blecautes In: SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA – SEPOPE ( 8.: 2002: DF, Brasília). *Anais*. IP-139.
- GRAIGNER, J. J.; STEVENSON Jr., W. D.; 1994. *Power System Analysis*, EUA: McGraw-Hill. p. 110.
- GUTIÉRREZ, J.; STAROPOLSKI, M.; GARCIA, A.; 1987. Policies for Restoration of Power System , *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.2, n. 2 (may), p. 436-442.
- HEILBRONN , B.; CORERA, J. M.; FANDINO, J. et al. 1993. A Survey of Expert Systems for Power System Restoration, *CIGRÉ - TF 38.06.04 Électra*, (Oct.), p. 87-105.
- HOTTA,K.; NOMURA, H.; TAKEMOTO H. et al. 1990. Implementation of a Real- Time Expert System for a Restoration Guide in a Dispatching Center. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 5, n. 3 (Aug.), p. 1032-1038.
- HUNEAULT, M.; ROSU, C.; MANOLIU R. et al. 1994. A Study of Knowledge Engineering Tools in Power Engineering Applications. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 4 (Nov.), p. 1825-1832.
- HUNT, S.; SHUTTLEWORTH, G.; 1996. *Competition and Choice in Electricity*, Inglaterra : John Wiley & Sons. p. 1-3.
- IEEE; 1990, *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. IEEE Std 610.12-1990. New York USA.
- IEEE - THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS; 1994, *IEEE Standard Definition, Specification, and Analysis of System Used for Supervisory Control, Data Acquisition, and Automatic Control*. IEEE Std C37.1. New York USA.

- KEARSLEY, R.; 1987. Restoration in Sweden and Experience Gained from the Blackout of 1983. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 2, n. 2 (May), p.422-428.
- KIRSCHEN, D. S.; VOLKMANN T. L.; 1991. Guiding a Power System Restoration with an Expert System. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 6, n. 2 (May), p. 558-566.
- KOBAYASHI, T.; MORIDERA, D.; FUKUI, S. et. al.; 1994. Verification of an Advanced Power System Restoration Support System Using an Operator Training Simulator. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 2 (May), p.707-713.
- KOJIMA, Y.; WARASHINA, S.; NAKAMURA, S. et. al.; 1989a. Development of a Guidance Method for Power System Restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 4, n. 3 (Aug.), p.1219-1227.
- KOJIMA, Y.; WARASHINA, S.; KATO, M. et. al.; 1989b. The Development of Power System Restoration Method for a Bulk Power System by Applying Knowledge Engineering Techniques. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 4, n. 3 (Aug.), p.1228-1235.
- KOSTIC, Tatjana; 1997. *Decision Aid Function for Restoration of Transmission Power Systems After a Blackout*. Laussane Suiça. Tese (Doutorado Técnico em Ciências – Escola Politécnica Federal de Lausanne).
- KOSTIC, T.; CHERKAOUI, R.; GERMOND, A. et. al.; 1998. Decision Aid Function for Restoration of Transmission Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 13, n. 3 (Aug.), p.923-929.
- KROST, G.; SALEK, K.; SPANEL, U.; 1999. Implementation and Verification of a Generic Restoration Guidance System. In INTELLIGENT SYSTEM APPLICATION TO POWER SYSTEMS (Abr. 1999 : Rio de Janeiro). *Anais*. Rio de Janeiro, p.56-60.
- LEE, H. J.; PARK, Y. M.; 1996. A Restoration Aid Expert System for Distribution Substations. In: IEEE/PES WINTER MEETING, Baltimore, Jan. 1996.

- LEE, S. J.; LIM, S. I.; AHN S. B.; 1998. Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 13, n. 3 (Aug.), p. 1156-1163.
- LEFRÉVE, A. P.; SILVEIRA, J. R.; 1997. Blackouts – Causas e Reflexos sobre a Sociedade. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SNPTEE ( 14.: 1997: Pará, Belem). *Anais*. p. 1- 7.
- LISBÔA, E.; 2001. Curto-circuito deixa 2 milhões sem luz, *Diário Catarinense*. Florianópolis, 06 dez.
- MACÊDO, J. D.; MARTINO, M. B.; SILVA, M. B. et. al.; 1999. Sistema Especialista de Auxílio à Recomposição do Sistema FURNAS. In: XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (15.: Out. 1999 : Foz do Iguaçu, Paraná). 1999.
- MANDAN S.; BOLLINGER K. E.; 1997. Applications of Artificial Intelligence in Power Systems. *Electric Power System Research*, Canada, n. 41 , p. 117-131.
- MARIANI E.; MASTROIANNI F.; ROMANO V.; 1984. Field Experiences in Reenergization of Electrical Networks from Thermal and Hydro Units. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. 103, n. 7 (Jul.), p. 1707-1713.
- MATSUMOTO, K.; SAKAGUSHI, T.; KAFKA R. J. et al.; 1992. Knowledge-Based Systems as Operational Aids in Power System Restoration. *Proceedings of the IEEE*, New York, v. 80, n. 5 (May), p. 689-697.
- MELLO F.P.; WESTCOTT J.C.; 1994. Steam Plant Startup and Control in System Restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 9, n. 1 (Feb.), p. 93-101.
- MONDON, E.; HEILBRONN B. HARMAND Y. et al.; 1992. MARS: An Aid Network Restoration After a Local Disturbance. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 7, n. 2 (May), p. 850-855.
- MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A.; 1989. Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 4 (Oct.), p. 2235-2241.

- MORIN, G. ; 1987. Service Restoration Following a Major Failure on the Hydro-Québec Power System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 2, n. 2 (Apr.), p. 454-462.
- MUNDIM, Marcos Vinicius; 1996. *Desenvolvimento de uma Ferramenta Inteligente para Restabelecimento de Sistemas de Energia Elétrica*. Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- NADIRA, R.; LIACCO, T. E.; LOPARO, K. A.; 1992. A Hierarchical Interactive Approach to Electric Power System Restoration , *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v.7, n. 3 (Aug.), p. 1123-1131.
- NAGATA, T.; SASAKI, H.; YOKOYAMA, R.; 1995. Power System Restoration by Joint Usage of expert System and Mathematical Programming Approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 10, n. 3 (Aug.), p. 1473-1479.
- NAGATA, T.; SASAKI, H.; 2001. A Multi-Agent System for Power Restoration, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, v. 3, p. 1359-1364.
- NICOLA, P.; 2002. Apagão Atinge 10 Estados, *O Estado de São Paulo*. São Paulo, 22 jan.
- ONS; 2000. Procedimentos de Rede, 2000. Estabelecem os procedimentos e os requisitos técnicos para o planejamento, a implantação, o uso e a operação do Sistema Interligado Nacional e as responsabilidades do Operador Nacional do Sistema e de todos os demais Agentes de Operação.
- PAMPLONA, N.; 2002. Apagão Atinge dez Estados, *O Estado de São Paulo*. São Paulo, 22 jan.
- RAM, D. S.; 1997. *Intelligent Systems for Engineering*. 1. ed. Londres : Springer.
- ROLIM, Jacqueline Gisèle; 1995. *Sistema Especialista de Apoio ao Controle de Tensão/Potência Reativa, Incluindo Manobras Sobre a Topologia da Rede*. Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SCARAMUTTI, José Carlos; 1999. *Aplicação de Algoritmos Genéticos no Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição*. Florianópolis.

- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SAKAGUCHI, T.; MATSUMOTO, K.; 1983. Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. 102, n. 2 (Feb.), p. 320-326.
- SHAH, S.; SHAHIDEHPOUR, S. M.; 1989. A Heuristic Approach to Load Shedding Scheme. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. 4, n. 4 (Oct.), p. 1421-1429.
- SHAHIDEPOUR, S. M.; KIRSCHEN, D. S.; 1992. Expert System for Power System Restoration. In: NEW APPROACHES IN POWER SYSTEM RESTORATION. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 7, n. 4 (Nov.), p. 1430-1434.
- SHIMAKURA, K.; INAGAKI, J.; MATSUNOKI, Y. et al.; 1992. A Knowledge-Based Method for Making Restoration Plan of Bulk Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 7, n. 2 (May), p. 914-920.
- SRIRAM, R.D.; 1997. *Intelligent Systems for Engineering* 1. ed. Inglaterra: Springer.
- TEO, C. Y.; SHEN, W.; 2000. Development of an Interactive Rule-Based System for Bulk Power System Restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 15, n. 2 (May), p. 646-653.
- TSAI , W. T.; VISHNUVAJALA, R.; ZHANG D.; 1999. Verification and Validation of Knowledge-Based Systems. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, New York, v. 11, n. 1 (Feb), p. 202-212.
- VALE, M. H. M.; LOBATO, M. V.; VISACRO FILHO, S. et. al.; 1997. SAR – Sistema Especialista de Apoio ao Restabelecimento. In: XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Belém, Pará, 1997.
- VALE, M. H. M.; VALE, M. I. M.; LAMEIRAS, M. S. et. al.; 1999. SARESTA – Sistema de Restabelecimento Integrado ao Sistema de Supervisão e Controle Distribuído da CEMIG. In: XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Foz do Iguaçu, Paraná, Out. 1999.

WU, F. F.; MONTICELLI, A.; 1988. Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 3, n. 1 (Feb), p. 10-16.