

LUIZ ANTONIO MASSELLI BERNARDO

**SISTEMA INTELIGENTE DE APOIO AO
RESTABELECIMENTO DE SISTEMA ELÉTRICO
NA FASE FLUENTE**

**FLORIANÓPOLIS
2000**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA INTELIGENTE DE APOIO AO
RESTABELECIMENTO DE SISTEMA
ELÉTRICO 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.

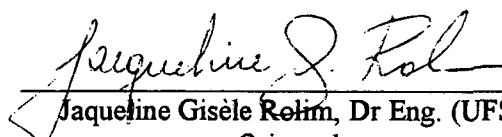
LUIZ ANTONIO MASSELLI BERNARDO

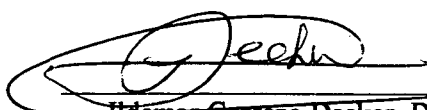
Florianópolis, Março de 2000.

SISTEMA INTELIGENTE DE APOIO AO RESTABELECIMENTO DE SISTEMA ELÉTRICO NA FASE FLUENTE

Luiz Antonio Masselli Bernardo

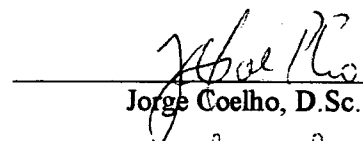
‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Potência, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’


Jaqueline Gisèle Rolim, Dr Eng. (UFSC)
Orientador



Idemar Cassana Decker, D.Sc. (UFSC)
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:


Jaqueline Gisèle Rolim, Dr Eng. (UFSC)
Presidente


Jorge Coelho, D.Sc. (UFSC)


Hans Helmut Zurn, Ph.D. (UFSC)


Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing. (UFSC)

Ao meu pai (*in memoriam*)

Agradecimentos

Ao corpo docente do curso de Pós graduação em engenharia elétrica da UFSC, que transmitiram seus conhecimentos;

A Professora Jaqueline Gisèle Rolim pelo trabalho de orientação;

Aos colegas do curso de Pós graduação em engenharia elétrica da UFSC;

A minha esposa Valéria e filhos Gustavo e Alvaro pelo amor, carinho e compreensão demonstrados pela distância e ausência;

A COPEL em especial aos gerentes Odair Polesel e Luiz Fernando Leone Vianna, pelo incentivo e apoio;

A todos amigos e funcionários do LABSPOT.

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

SISTEMA INTELIGENTE DE APOIO AO RESTABELECIMENTO DE SISTEMA ELÉTRICO NA FASE FLUENTE

Luiz Antonio Masselli Bernardo

Março/2000

Orientador: Jacqueline Gisèle Rolim

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Palavras-chave: Controle Restaurativo, Sistemas Especialistas, Recomposição Fluente.

Número de Páginas: 70

RESUMO: Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma ferramenta inteligente de apoio aos operadores dos Centros de Operação de Estações (COE) na tarefa de recompor o sistema elétrico na etapa fluente. Normalmente, após vários estudos efetuados pelos setores de engenharia, as empresas elaboram volumosos manuais com regras que orientam os operadores na restauração do sistema após contingências. A complexidade do problema da recomposição e a existência destas regras tornam a técnica de sistemas especialistas apropriada à tarefa da recomposição fluente. O uso de um sistema especialista para apoio aos operadores agiliza o processo de restaurar o sistema e reduz os riscos de erro humano durante a seqüência de manobras. O sistema especialista desenvolvido utilizou como sistema teste a rede de transmissão da região de Ponta Grossa, Paraná, do sistema da Companhia Paranaense de Energia (COPEL), e suas potencialidades foram avaliadas por operadores deste COE. Por possuir a ferramenta desenvolvida as características de simplicidade na utilização, rapidez de execução e interface amigável, existe a possibilidade de aplicá-la também ao treinamento de operadores.

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

AN INTELLIGENT SYSTEM FOR RESTORATION OF ELECTRIC SYSTEMS DURING FLUENT PHASE

Luiz Antonio Masselli Bernardo

Mar/2000

Advisor:.. Jacqueline Gisèle Rolim

Area of Concentration: Power Systems

Keywords: Restorative Control, Expert Systems, Fluent Restoration

Number of Pages: 70

ABSTRACT: This dissertation describes the development of an intelligent tool to support Station Control Operators (COE) in the task of restoring the electrical system during the fluent phase. Usually, after performing several studies, the engineering sectors of electric utilities elaborate huge manuals with rules that give directions to operators in order to restore the system after contingencies. The complexity of restorative control and the existence of these rules make the expert systems technique appropriate to deal with the fluent restoration problem. The support from an expert system makes the process of restoring the system faster and more secure, as it avoids human errors. The developed expert system was tested using part of the transmission network of *Companhia Paranaense de Energia* (COPEL) in Ponta Grossa region, Paraná state, and its potentialities were evaluated by operators of this region operation centre. The intelligent tool has several features, for instance, simplicity and friendly interface, that makes it suitable to the task of operators training.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	5
2 - OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA.....	9
2.1 - INTRODUÇÃO	9
2.2 - SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO	10
2.3 - ESTADOS OPERATIVOS DO SISTEMA	15
2.4 - CONTROLE RESTAURATIVO	18
2.5 - CONCLUSÃO	24
3 - CONTROLE RESTAURATIVO.....	27
3.1 - INTRODUÇÃO	27
3.2 - FERRAMENTAS DE APOIO AO CONTROLE RESTAURATIVO.....	29
3.3 - CONCLUSÃO	31
4 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA APOIO AO RESTABELECIMENTO	31
4.1 - INTRODUÇÃO	31
4.2 - SISTEMA TESTE UTILIZADO	31
4.3 - ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA IMPLEMENTADO	31
4.4 - BASE DE CONHECIMENTO	31
4.5 - EXEMPLOS DE RESULTADOS	31
4.6 - CONCLUSÃO	31
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	31
APÊNDICE I - FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	31
I.1- INTRODUÇÃO.....	31
I.2 – ESTRUTURA E ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 - INTRODUÇÃO

A qualidade e a continuidade do fornecimento da energia elétrica estão diretamente ligadas à eficiência da operação dos sistemas elétricos de potência (SEP), responsável pelo controle da energia elétrica desde a sua geração, a partir de fontes primárias de energia, passando pela sua transmissão até a distribuição aos consumidores.

A energia elétrica é consumida no mesmo instante em que é gerada, o que exige que o sistema elétrico tenha, a todo o momento, condições de gerar, transportar e distribuir a energia que lhe é demandada pelos consumidores. Quaisquer alterações de topologia ou falhas no funcionamento de seus componentes podem afetar o sistema como um todo e, conseqüentemente, comprometer o fornecimento de energia elétrica aos consumidores.

Os principais equipamentos dos SEP são os geradores, transformadores, reatores, bancos de capacitores, compensadores síncronos e estáticos, e as redes de transmissão e distribuição. A maior parte destes equipamentos são agrupados nas usinas e subestações.

As subestações atendem principalmente à necessidade de interligação, transformação e controle de tensão dentro de um sistema de energia elétrica. Podem ser operadas localmente ou teleoperadas por um centro regional. Um centro de operação regional pode controlar várias subestações de chaveamento, de transformação (carga) e de compensação de reativos, ou, como é mais usual, subestações com interligações, transformação e compensação de reativo. Portanto, um centro de operação regional poderá atender a uma ou a todas essas atividades.

Existem diversos arranjos de subestações diferenciados pela quantidade de equipamentos de manobra e interligações entre os mesmos. A topologia de uma subestação é definida na etapa de projeto, considerando-se a relação custo-benefício, sendo o benefício a maior confiabilidade resultante de topologias mais versáteis, que permitem maior número de manobras para isolar equipamentos defeituosos, reduzindo riscos de interrupções no suprimento.

O atendimento ao consumidor, objetivo primeiro e base do negócio energia elétrica, deve obedecer a critérios de qualidade de fornecimento da energia elétrica, avaliados através de quatro atributos principais do sistema elétrico (Thomaz et al., 1998):

- Disponibilidade – normalmente considera somente o aspecto relativo à continuidade do suprimento;
- Conformidade - fornecimento de energia sem distorções harmônicas;
- Restaurabilidade – capacidade de restaurar rapidamente o fornecimento após contingências;
- Flexibilidade – existência de equipamentos de manobras para alterações de topologia.

Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, órgão federal fiscalizador dos serviços de eletricidade, supervisiona apenas os índices de qualidade de fornecimento ligados aos fenômenos de longa duração quanto a violações de tensão e interrupções no fornecimento.

As interrupções do fornecimento de energia representam energia não atendida e acarretam prejuízos, não só para concessionária, mas também para os consumidores em geral. O objetivo da ANEEL e das empresas do setor de energia elétrica é diminuir o número e a duração destes desligamentos, que são medidos pelos índices DEC (Duração

Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora).

Os arranjos das subestações, além de atenderem aos requisitos da operação em condições normais, devem também possuir características que permitam absorver os impactos de condições anormais de operação. A obtenção da melhor condição operativa implica pois em se considerar estudos que abrangem as probabilidades de defeitos nos componentes do sistema, sendo o objetivo final reduzir ao mínimo viável economicamente, a probabilidade de não atendimento ao consumidor.

Como não se consegue projetar e construir sistemas elétricos totalmente imunes às perturbações, sejam elas originadas de fenômenos elétricos, ambientais ou de ação humana, procura-se então minimizar os seus efeitos. O nível de risco adotado deve refletir a relação ótima entre a importância das cargas atendidas, os investimentos necessários à diminuição dos riscos e a remuneração destes investimentos.

A implantação de técnicas e procedimentos operativos que proporcionem maior rapidez na recomposição do sistema após desligamentos parciais ou totais, constitui um dos caminhos para se reduzir os impactos impostos pelas perturbações no sistema, e alcançar soluções que aumentem a rapidez e o grau de segurança na execução do restabelecimento de uma subestação ou conjunto de subestações.

Este trabalho apresenta a proposta de utilização da técnica de Sistemas Especialistas no restabelecimento de subestações teleoperadas, também chamadas de *desassistidas*, pelos centros de operação regionais. O sistema desenvolvido dá apoio a operação durante a recomposição fluente. Nesta etapa os operadores dos centros regionais

não precisam entrar em contato com os centros de operação principais para tomarem decisões.

Inicialmente, no Capítulo II, é apresentado um estudo da operação dos SEP, com ênfase no sistema elétrico brasileiro em ambiente desregulamentado e suas peculiaridades. Em seguida, no Capítulo III, é abordada a filosofia do controle restaurativo, os critérios operativos necessários ao restabelecimento de uma ou várias subestações e a revisão bibliográfica sobre ferramentas de apoio aos operadores nesta tarefa. No Capítulo IV, são descritas as etapas de projeto, desenvolvimento e validação de um protótipo do sistema especialista para apoio ao restabelecimento na fase fluente, aplicado ao caso do Centro de Operação de Estações (COE) de Ponta Grossa, pertencente à Companhia Paranaense de Energia - COPEL. No Capítulo V é feita uma avaliação quanto aos aspectos qualitativos, e são apresentadas as conclusões a respeito das vantagens e limitações da utilização de sistemas especialistas no apoio ao restabelecimento automático, em conjunto com os horizontes de futuras aplicações e áreas de interesse potencial.

2 - OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - INTRODUÇÃO

As empresas de energia elétrica têm como atividade fim o suprimento de eletricidade aos consumidores de uma região, dentro de padrões de qualidade, confiabilidade e economia. Suas redes elétricas estão usualmente espalhadas por grandes regiões geográficas e são compostas basicamente pela geração, centralizada nas usinas; transmissão, composta pelas linhas de transmissão e subestações de alta, extra alta e ultra alta tensão; e pela distribuição, composta pelas redes e subestações em tensão mais baixa e próximas aos centros consumidores.

Cada usina ou subestação dispõe localmente de vários recursos para manter o sistema operando em boas condições. Alguns fenômenos elétricos ou ações efetuadas sobre a rede elétrica têm, no entanto, efeitos que afetam a rede mais globalmente, levando à necessidade de coordenação e supervisão centralizadas da operação.

As relações entre a operação do sistema e a operação das instalações caracterizam-se por uma hierarquia bem definida, pela interdependência e complementariedade de ações, bem como por atividades específicas, em que os produtos da operação do sistema são insumos para a operação das instalações.

Algumas das funções que são responsabilidade dos operadores nas usinas e subestações e/ou dos despachantes nos centros de operação principais são: controle de tensão, controle de frequência, controle do fluxo nas interligações entre empresas, além da monitoração constante do sistema, a fim de detectar, identificar e tratar possíveis ocorrências no sistema. Estas ocorrências podem variar de casos simples, como um

aquecimento aceitável em transformador, até blecautes envolvendo grande parte do sistema e alto número de consumidores.

Nos centros de operação das principais das empresas existem alguns programas de apoio à operação, tais como estimadores de estado e programas para análise de segurança. Nos centros de operação regionais, ou nas subestações que possuem operadores, em geral existe apenas a parte de supervisão e os operadores tomam suas decisões baseados em sua experiência e em volumosos manuais preparados pelos setores de estudo das empresas, nos quais tenta-se prever o maior número de situações possível e as providências que os operadores devem tomar nestas situações.

Para que as empresas de geração, de transmissão e de distribuição realizem a operação das suas instalações, sem prejudicarem umas às outras, há necessidade de que tanto estes manuais quanto a própria programação da operação sejam elaboradas considerando o sistema interligado como um todo.

2.2 - SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO

O sistema elétrico brasileiro possui características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. Até recentemente este sistema era formado por dois grandes sistemas interligados, um com as empresas das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e outro reunindo as concessionárias da região Nordeste e parte da região Norte. No final de fevereiro de 1999, esses dois sistemas foram unidos por uma linha de transmissão com 1000 MW de capacidade, a Interligação Norte-Sul, passando a formar um único sistema interligado de

âmbito nacional com aproximadamente 96% da capacidade de produção de eletricidade do país.

Em 1995, iniciou-se o processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro, o qual vem sendo efetuado de forma gradual e busca introduzir concorrência e investimentos privados nesse setor, quebrando o monopólio do Estado e separando as atividades de geração, transmissão e distribuição. Existem algumas leis e decretos que foram passos importantes em direção ao novo modelo: (RUDNICK et al.,1998)

- Lei 8987 de 1995– define atribuições da autoridade sobre as concessões a fim controlar a qualidade dos serviços, tarifas, motivar competição, com poderes para inclusive extinguir concessões;
- Lei 9427 de 1996, que criou a agência reguladora ANEEL;
- Lei 9648 e o decreto 2655 de 1998 que criaram o Mercado Atacadista de Energia (MAE) e o Operador Independente do Sistema (ONS). Em uma fase de transição que irá até 2005, a lei 9648 prevê que os contratos de compra e venda de energia elétrica ainda terão seus preços regulamentados e homologados pela ANEEL. O decreto 2655 estabelece que as atividades do atual Grupo Coordenador da Operação Interligada (GCOI) serão gradualmente transferidas ao ONS.

Várias regras específicas vêm sendo elaboradas pela ANEEL para estruturar o novo modelo.

Instituído como entidade privada, sob a forma de associação civil, o ONS é formado pelas empresas de geração, transmissão, distribuição, importadores e exportadores de energia e consumidores livres, tendo o Ministério de Minas e Energia como membro

participante, com poder de veto em questões em que existam conflitos com as diretrizes e políticas governamentais para o setor. Também tomam parte nessa associação os Conselhos de Consumidores.

O ONS é responsável pelas atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica nos sistemas interligados, assegurando a qualidade e a economicidade do suprimento de energia elétrica e garantindo o livre acesso à rede básica. Cabe ao ONS toda a responsabilidade pelos processos de programação da operação, operação em tempo real e pós-operação, visando otimizar a operação dos recursos do sistema, garantindo a confiabilidade, segurança e integridade do conjunto das instalações que constituem a rede.

A operação harmônica do sistema interligado depende da definição das áreas de atuação das empresas e da hierarquização da autoridade e responsabilidades nas várias atividades relacionadas a, por exemplo: controle da geração, da frequência, da operação do CAG, da recomposição, da segurança do sistema, etc.

No Brasil a coordenação e supervisão geral da operação do sistema interligado cabe ao CNOS – Centro Nacional de Operação do Sistema. No primeiro nível de hierarquia o CNOS é responsável pela coordenação, supervisão e controle da rede básica e a seu critério da rede complementar, atuando diretamente ou através de delegação aos demais Centros de Operação do ONS (ONS;1999).

Em um segundo nível de hierarquia, ainda ligados ao ONS, vêm os centros de operação regionais (sul, sudeste, norte e nordeste) e contratados (empresas que prestam serviço ao ONS).

Em um terceiro nível estão os centros de operação dos sistemas locais. No quarto nível estão os centros de operação das empresas de geração ou transmissão e por último, no

quinto nível hierárquico, estão as salas de controle de usinas ou de subestações de empresas de geração, transmissão ou distribuição.

A Figura 1 fornece a estrutura do relacionamento operacional em tempo real para as empresas da região sul, a partir do centro de operação da região sul (COSR-S), antigo centro de operação da ELETROSUL (ONS, 1999). Estão subordinadas a este centro de operação as empresas de geração (GERASUL, COPEL, CEEE e CGTEE), de transmissão (ELETROSUL, COPEL e CEEE) e de distribuição (CELESC e ENERSUL) da região sul e Mato Grosso do Sul.

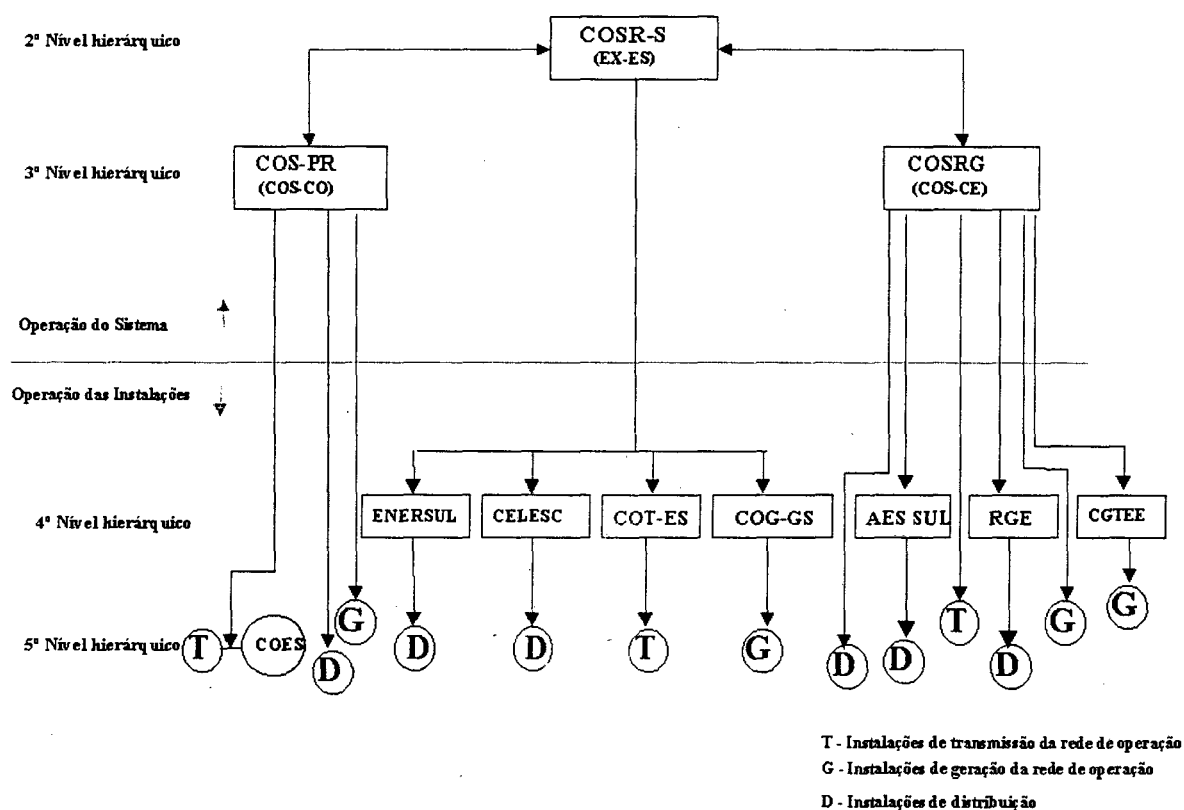


Figura 1 – Operação do Sistema Sul Interligado

Em algumas destas empresas a rede elétrica é de tal extensão que se torna conveniente a divisão do sistema em regiões, cada uma coberta por um centro de controle

de menor porte. Esses centros, algumas vezes chamados de "Centro de Operação de Estações COE", possuem a sua própria responsabilidade no processo operativo e são por sua vez coordenados por um centro de controle hierarquicamente superior, no caso o "Centro de Operação do Sistema COS" da mesma empresa concessionária.

Outro fator que levou à criação de centros regionais menores foi o processo de automatização das subestações. Seguindo a tendência mundial de modernização dos sistemas de supervisão e controle das subestações, em várias empresas brasileiras foram retirados os operadores das subestações de menor porte, e transferidas as funções de supervisão e parte dos comandos dessas para outras subestações próximas, o que reduziu custos operacionais e permitiu uma melhoria nas condições de segurança para operação das redes. Estas mudanças têm seguido o caminho mais natural, iniciando com a teleoperação de unidades através dos COEs e evoluindo para a implantação de funções nos computadores localizados em cada unidade.

Estes programas podem em alguns casos cumprir automaticamente as rotinas de operação, minimizando a relação de equipamentos a operar por operador remoto, pelo menos para os processos mais simples como o controle de tensão através de comutação de tap de transformador. Podem também incluir funções apoio para tarefas tais como a recomposição fluente em subestações (ALMEIDA et al.,1995).

Os operadores nos COEs nas subestações e usinas atuam apenas na sua parte do sistema e têm como responsabilidade principal a execução da operação programada. No caso específico da recomposição após contingências, os manuais de operação definem claramente as manobras que podem ser executadas sem contato com os centros de operação, na chamada recomposição fluente, e quais precisam supervisão por hierarquia mais alta, por exemplo, manobras para fechamento de anéis.

2.3 - ESTADOS OPERATIVOS DO SISTEMA

O despacho do sistema brasileiro é definido na etapa de pré-operação para todo sistema interligado, e esta programação é passada aos centros de operação e empresas para execução. Na operação em tempo real os operadores e despachantes fazem os ajustes que forem necessários em relação ao despacho programado.

A operação em tempo-real envolve, normalmente, longos períodos de atividade rotineira mesclados com momentos ocasionais de crise. Na operação sem ocorrências graves os operadores se preocupam principalmente com a monitoração do sistema, e executam pequenos ajustes nos controles a fim de manter o sistema operando próximo ao programado. Em subestações, esses ajustes ocorrem principalmente na posição de tap de transformadores e são necessários devido à diferença entre os valores previstos de carregamento e os ocorridos.

Nas situações de crise, quando acontecem violações graves no sistema e/ou ocorrência de desligamentos forçados, as atividades dos operadores se tornam mais complexas e, muitas vezes, críticas para o sistema como um todo, pois uma manobra errada pode agravar situações e levar a grandes blecautes.

Um sistema está operando em modo "seguro" quando há baixa probabilidade de blecautes ou danos a equipamentos (STOTT et al., 1987). O estado de operação de um sistema pode ser avaliado através de programas de fluxo de potência e análise de contingências. Os modos de operação, ou "Estados Operativos", podem ser classificados em Estado Normal Seguro, Estado Normal Alerta, Estado de Emergência e Estado Restaurativo, conforme Figura 2.

A classificação do sistema entre os vários estados é feita considerando-se as seguintes restrições: atendimento da carga, respeito às restrições do operação (basicamente limite de carregamento nas linhas de transmissão e transformadores, nível de tensão nas barras) e restrições de segurança.

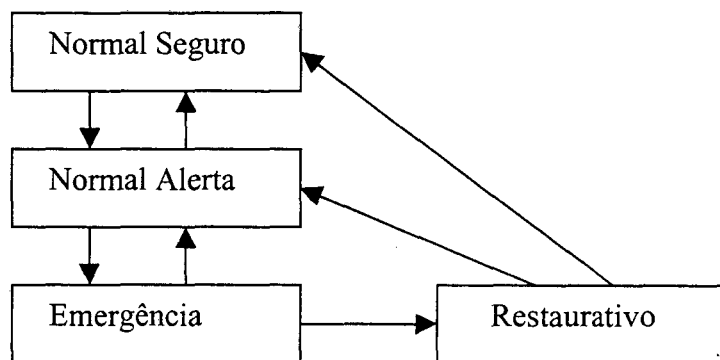


Figura 2 - Estados Operativos do Sistema

Tanto no estado normal alerta quanto no normal seguro todas as cargas estão sendo atendidas sem violações de limites operacionais. A diferença entre estes dois estados está nas restrições de segurança, sendo que no caso do estado normal alerta existe ao menos uma contingência que caso venha a ocorrer levará o sistema para o estado de emergência. Em algumas situações é possível que controles preventivos levem o sistema do estado normal alerta para o normal seguro.

No estado de emergência as cargas são supridas, mas há violações em limites operacionais que podem, em alguns casos, serem corrigidos através de ações de controle (retorno ao estado normal alerta ou normal seguro) e, em outros, apenas com corte de carga (sistema iria para estado restaurativo).

No estado restaurativo não existem violações nos limites operacionais, mas cargas já foram perdidas ou cortadas.

Os sistemas de potência operam em estado normal a maior parte do tempo. Esses sistemas são capazes de se manter operando normalmente, com pouca ou nenhuma intervenção do operador.

Quando a partir de um determinado evento o sistema vai do estado normal para o de emergência, há um modo acelerado de operação com tomadas de decisões urgentes, sendo a eficiência dos operadores vital para a segurança do sistema. Se o controle de emergência não for efetivo e o sistema continuar operando ou em baixa frequência ou com tensões anormais ou com equipamentos sobrecarregados, este estado pode evoluir para o que alguns autores (GUTIERREZ et al., 1987) denominam de situação extrema, onde não são atendidas nem as restrições de igualdade, nem as operacionais. A perda de cargas pode ser ocasionada pelo desligamento de geradores ou de linhas de transmissão, desligamentos estes causados pela atuação das proteções ou por medida de segurança adotada pelos centros de operação. Isto afeta diretamente os consumidores e, eventualmente, pode constituir-se num colapso total.

Na evolução do estado restaurativo para o normal o papel dos operadores e despachantes é primordial. O tempo é curto, o que não permite que os responsáveis pela recomposição consultem os manuais de operação, que objetivam prepará-los para o maior número de situações possível. Por outro lado, por maior que seja a experiência dos operadores do sistema, algumas ocorrências são extremamente raras, o que também dificulta o aprendizado a partir de casos passados.

O aumento da demanda, sem os necessários investimentos para reforçar o sistema elétrico brasileiro tem levado a ocorrência de um maior número de blecautes, e o impacto

destas ocorrências na opinião pública validou a importância de uma restauração eficaz e rápida (LEFÉVRE et al.,1997), tornando indispensável fornecer aos despachantes e operadores ferramentas de apoio que evitem o não raro “erro humano”, minimizando os riscos do sistema caminhar de um estado com prejuízos limitados para o colapso total.

2.4 - CONTROLE RESTAURATIVO

Após a ocorrência de algum desligamento permanente, denomina-se controle restaurativo às ações necessárias para o restabelecimento do sistema elétrico. Este envolve o processamento de um grande número de informações e ações a serem executadas em um período curto e sem falhas. Dependendo da gravidade e extensão dos desligamentos, estas ações são coordenadas pelos operadores dos Centros de Operação, os quais agem também baseados em instruções de operação elaboradas pelos setores de estudos das empresas e do ONS, considerando aspectos mais gerais do seu sistema de atuação, supervisionando e coordenando:

- a energização de transformadores;
- energização de linhas de transmissão;
- rejeição de carga;
- atuação das proteções;
- manobra de disjuntores.(COPEL NORMA TÉCNICA,1988)

A filosofia do restabelecimento do sistema elétrico brasileiro divide o processo em duas fases distintas, para as ações de recomposição denominadas (ALMEIDA et al., 1995):

- fase fluente - São executados procedimentos e ações previamente definidos com o objetivo de recompor as áreas de auto-restabelecimento (os operadores executam as manobras sem apoio do COS) e atender os montantes máximos de carga prioritárias definidas para esta fase.
- fase coordenada - Nesta fase são executadas ações de controle para o fechamento de 'paralelos' ou 'anéis' entre as áreas já estruturadas durante a fase fluente e para ligações das cargas adicionais.

O grande benefício desta filosofia de recomposição é justamente permitir que o auto-restabelecimento execute isoladamente as ações de restauração de importantes centros de forma simultânea e independente das demais áreas, minimizando o exaustivo trabalho de coordenação. Atualmente existem muitos estudos de automação dos procedimentos estabelecidos para a fase fluente, adotando-se principalmente as técnicas e recursos de inteligência artificial, o que aumenta a rapidez e a segurança do processo (GIMENES et al., 1996).

A fase da recomposição, denominada fase coordenada, é comandada pelos despachantes dos COS que, após determinar a extensão da ocorrência, verificando a configuração resultante, vão coordenando a execução dos procedimentos de fechamentos de paralelos e anéis entre áreas. Durante a coordenação da recomposição os COS efetuam o controle da frequência e das tensões, liberando restabelecimento de cargas adicionais até obter-se o total restabelecimento do sistema. Cabe, ainda, aos COS intervir na recomposição fluente, caso seja observada alguma anormalidade ou haja solicitação por parte dos operadores das unidades envolvidas.

O processo de recomposição fluente visa o restabelecimento autônomo de subestações e usinas, dispensando o uso dos meios de comunicação entre as unidades.

Para possibilitar a execução da recomposição fluente, o procedimento tradicional tem sido o de distribuir previamente pelas unidades do sistema, subestações e usinas, as respectivas instruções de recomposição. Estas instruções orientam os operadores a agir em três tipos de situações:

- desligamento geral de subestação;
- desligamento geral de barramento;
- desligamento parcial de barramento.

Em princípio, as instruções de recomposição seguem as seguintes diretrizes:

- Em desligamentos gerais (de subestação ou de barramento) deve ser feita a preparação de todos os circuitos (da subestação ou do barramento) antes da recomposição, visando impedir a energização acidental de equipamentos impedidos de operar (com defeito) ou de cargas incompatíveis com a capacidade das fontes disponíveis.
- Em circuitos que possuem recursos para controle de tensão, devem ser executadas ações de preparação antes da recomposição. Estas ações vão desde a simples retirada de operação de bancos de capacitores até a comutação de tapes de transformadores.
- Em desligamentos gerais, a recomposição só deve ocorrer quando houver disponibilidade de fontes em quantidade suficiente para suprir a carga da unidade.
- Os procedimentos previstos nas instruções são baseados na configuração normal da unidade e em outras configurações comuns de operação.

As instruções prevêm que sejam obedecidos os sentidos de energização normais e respeitadas as restrições de religamento, quando da ocorrência de eventos especiais como múltiplos desligamentos sucessivos de um mesmo circuito, reinicialização do processo de

recomposição, atuação de proteções impeditivas, impedimento de circuitos por atuação de proteções especiais ou ainda por simultaneidade de execução de serviços de linha viva.

Com o surgimento dos COEs houve uma centralização da operação regional e a retirada dos operadores das subestações telecomandadas pelos COEs. Desta forma instaura-se uma complexidade de ações para um COE diante da recomposição fluente de diversas subestações por ele supervisionadas e telecomandadas, aumentando a carga de trabalho do operador nas situações de contingência e pós contingências.

Na forma em que estão estruturados os COEs, praticamente toda a recomposição é fluente, cabendo ao operador a tomada de decisão dentro das diretrizes pré-estabelecidas. As premissas básicas que nortearam a estratégia da recomposição estão enumeradas a seguir:

- Parte-se do pressuposto que o sistema está totalmente desenergizado.
- As unidades preparam-se para receber tensão com manobras do tipo "manter aberto ou abrir e manter fechado ou fechar" disjuntores.
- O processo desencadeia-se com o auto-restabelecimento das usinas com tal facilidade.
- Em primeira instância a recomposição evolui fluentemente, com autonomia dos operadores dentro de uma seqüência predeterminada, atendendo uma parcela da carga prioritária e com montante bem definido de potência nas interligações.
- Estão previstos, onde possível, fontes alternativas para recompor, em caso de falta da fonte principal.
- O restabelecimento da carga é feito em blocos, permanecendo os transformadores de carga conectados às barras. Os circuitos alimentadores de carga com tensão igual ou maior do que 69 kV são energizados seqüencialmente.

- O fechamento de paralelo nas interligações é efetuada sob coordenação. Para os demais circuitos, mesmo não sendo um circuito de interligação mas que possa através dele sincronizar os sistemas ou parte destes, os operadores devem obedecer os princípios de sincronismo.

Além da supervisão que o centro de operação do sistema exercerá desde o início da recomposição, haverá momentos nos quais será necessário a coordenação do despacho de carga para continuidade do processo, principalmente no fechamento das interligações com outras empresas. Nesta fase então, a recomposição será coordenada.

Pelas características do sistema elétrico e pela estruturação das instruções, espera-se um mínimo de intervenção do despacho de carga, pois nas instruções já estão embutidos os requisitos e procedimentos que contemplam as duas fases, com isto os operadores já estão preparados para a 2ª fase e até poderão tomar a iniciativa quando previsto na instrução.

As características do problema da recomposição de sistemas de potência, ou seja, aspectos combinatoriais quanto ao número possível de topologias, e a necessidade de atender a diversas restrições e critérios, dificultam a aplicação dos métodos clássicos de otimização a este problema, abrindo caminho para os métodos heurísticos. O apoio à restauração tem sido então uma das maiores áreas de aplicação de sistemas especialistas (CIGRÉ TASK FORCE 38.06.03.,1993).

O advento dos sistemas especialistas tornou possível a construção de programas computacionais que executem tarefas e dêem soluções similares às obtidas por especialistas, em problemas que não são eficientemente modelados matematicamente. O conhecimento contido nas normas de recomposição (ONS, 1999, COPEL, 1988) e o

adquirido pelos operadores com a experiência acumulada pode ser representado por um conjunto de regras, as quais compõem a base de conhecimento do sistema especialista. O mecanismo de inferência do sistema especialista (ver apêndice) é responsável pela parte de *raciocínio* deste sistema, partindo da situação atual e buscando as regras que se aplicam à esta situação, para atingir a meta de recompor o sistema.

O objetivo da aplicação de sistemas especialistas no restabelecimento automático de sistemas elétricos é fornecer meios pelos quais seja possível otimizar o processo de restabelecimento do ponto de vista operacional (reduzindo o risco de violações técnicas operativas) e econômico (diminuindo o tempo da interrupção das cargas).

Devido à complexidade da operação, e em especial da recomposição dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, pode-se conceber um conjunto de sistemas especialistas instalados em cada COE, operando independentemente em algumas etapas e trocando informações em outras. Este conjunto de sistemas ou agentes compartilhando informações e priorizando ações forma o que é chamado de sistema multi-agentes (TSAI, 1999).

Em alguns dos principais centros de operação do ONS e das empresas quais existem recursos computacionais para apoio à operação, dentre os quais pode-se citar alguns:

- O sistema de supervisão, usualmente denominado SCADA ("Supervisory Control and Data Acquisition"), que realiza a varredura em tempo-real de valores de grandezas elétricas de interesse;
- O Estimador de Estado, que realiza uma filtragem dos erros existentes nas medidas recebidas e, a partir destes valores e das informações sobre a topologia do sistema,

calcula módulo e ângulo da tensão em todas as barras o que permite o cálculo de qualquer outra grandeza;

- A função de análise de Segurança, que permite avaliar o grau de segurança corrente de operação, contribuindo para a solução do problema da confiabilidade do suprimento;
- O Despacho Econômico, que permite minimizar o custo da operação em tempo-real.

Com exceção do sistema SCADA, nem sempre as ferramentas citadas acima estão disponíveis para uso na operação em tempo real pelos operadores e despachantes, sendo em geral ferramentas para uso dos engenheiros em modo estudo. Os recursos disponíveis nas salas dos centros de operação de estações são ainda mais limitados.

Algumas ferramentas, em geral sistemas especialistas, têm sido propostos com o objetivo primário de aliviar o operador de tarefas rotineiras e dar-lhe mais segurança e agilidade no processo de tomada de decisão, tendo em vista que o operador funciona como elemento integrador do fluxo de informações no centro de operações, e tem papel essencial para a operação segura e eficiente do sistema.

Uma das primeiras tarefas destes sistemas de apoio seria o tratamento das informações recebidas no COE, adequando-as às variações nas necessidades de monitoração e controle do sistema elétrico.

2.5 - CONCLUSÃO

O dia a dia da rotina dos operadores do sistema elétrico é em geral tranquilo, sendo suas principais atividades a monitoração da rede e pequenos ajustes para manter as tensões

dentro de limites pré-estabelecidos. No entanto, no caso de ocorrências que levem a desligamentos definitivos, após uma etapa de diagnóstico e isolamento de equipamentos que porventura necessitem manutenção, os operadores passam a ser responsáveis pela atividade de restaurar o sistema às condições normais de operação. Esta tarefa pode ser mais ou menos complexa, dependendo da extensão dos desligamentos, mas é sempre executada com urgência.

O controle restaurativo é um problema que envolve diferentes atividades que vão desde estudos prévios, que tentam analisar grande número de situações possíveis para elaboração de instruções de operação, até a tomada de decisão em tempo real sob intensa pressão emocional dos operadores.

O sistema elétrico brasileiro, na forma em que está estruturado organizacionalmente tem nas suas instruções de recomposição o predomínio da etapa fluente, cabendo aos operadores dos centros de operação de estações e subestações efetuar seqüência de manobras dentro de diretrizes e regras estabelecidas nas instruções de operação.

Aos operadores dos principais centros de operação do sistema cabe a supervisão das ações das unidades durante a fase de recomposição fluente. A sua atuação apenas será solicitada nas situações onde houver necessidade de sua interferência direta, por exemplo, em função de eventuais impedimentos no processo de recomposição fluente, motivados por indisponibilidade de equipamentos ou situações não previstas.

A descentralização da recomposição do Sistema Elétrico Brasileiro, principalmente nos centros de operação do sistema - COS - e a teleoperação de subestações pelos Centros de Operação de Estações - COE - trouxeram uma certa independência para os operadores destes centros, que por outro lado ficaram mais sobrecarregados em situações de

emergência, aumentando a demanda por ferramentas eficazes que os auxiliem no processo de tomada de decisão, tornando o processo restaurativo mais rápido e seguro.

3 - CONTROLE RESTAURATIVO

3.1 - INTRODUÇÃO

Após dois grandes blecautes ocorridos no Brasil nos anos de 1984 e 1985, o então Grupo Coordenador da Operação Interligada (GCOI) determinou a implantação de um plano estratégico nacional de restabelecimento em situações de emergência (ALMEIDA et al.; 1995). Este plano estabeleceu a atual filosofia da recomposição em duas etapas: a etapa fluente, executada de forma descentralizada, e a etapa coordenada, comandada pelos despachantes do COS, os quais coordenam o fechamento de paralelos e anéis entre áreas, além de efetuarem o controle de frequência e tensões.

Para execução da recomposição fluente nas áreas de auto-restabelecimento é necessário que os operadores tenham instruções detalhadas sobre as manobras a serem seguidas e as condições para executá-las. Devido ao elevado número de estudos efetuados para preparação destas instruções e a quantidade de situações que devem ser previstas, estas instruções são normalmente extremamente volumosas.

Durante o processo da recomposição fluente cabe ao operador analisar as condições do sistema e aplicar com segurança ações a fim de restaurar sua área de responsabilidade com segurança e eficiência. Como não há tempo disponível nestas ocasiões para que os operadores consultem as instruções de operação, os mesmos costumam agir baseados na experiência adquirida em situações anteriores e durante treinamento, possivelmente com uso de simuladores (KOPIK; 1997). Uma das conclusões, obtidas da detalhada análise das ocorrências que levaram aos blecautes citados anteriormente, é a necessidade de avaliar-se

periodicamente o nível de aprendizado das instruções de operação efetuando-se novos treinamentos (LEFÉVRE et al.; 1997).

Os desafios enfrentados pelas empresas e a operação de sistemas mais complexos e mais próximos dos seus limites não permitem mais que se espere que os operadores aprendam a partir de experiências ao longo do tempo. Além disso, a renovação do quadro de despachantes em quase todas empresas do sistema interligado brasileiro reforça a necessidade de se disponibilizar ferramentas de apoio que tornem segura a operação do sistema elétrico, em particular a restauração do sistema pós-contingências.

A introdução da tecnologia digital na supervisão e controle do sistema elétrico e o advento da aplicação prática das técnicas de inteligência artificial tornaram possível o desenvolvimento de sistemas inteligentes de apoio à recomposição, ligados ao processo de automação de subestações (LEE et al.,1999).

A atuação independente das subestações na etapa da recomposição fluente acelera o processo de restauração e evita o congestionamento dos sistemas de comunicações com os COS.

O desenvolvimento de sistemas especialistas para apoio aos operadores durante a recomposição do sistema elétrico em geral prevê apenas a etapa fluente, já que a utilização de sistemas especialistas para apoio aos despachantes no COS na fase coordenada, embora também fosse extremamente útil, possui dificuldades de desenvolvimento devido ao volume de conhecimento que seria necessário para alcançar um sistema capaz de atuar considerando todas as variáveis e restrições controladas pelos despachantes para definir suas estratégias de ação.

3.2 - FERRAMENTAS DE APOIO AO CONTROLE RESTAURATIVO

Os SEP estão se tornando cada vez maiores e mais complexos, com a restrição da faixa de controlabilidade disponível para operação dos mesmos. Além disso, a agência reguladora ANEEL está cobrando maior qualidade e confiabilidade no atendimento aos consumidores. Dentro destas circunstâncias, manter um controle efetivo do sistema, minimizando o número de interrupções e durações das mesmas, torna-se uma tarefa difícil aos operadores. Esta situação impõe maiores investimentos em treinamento periódico e em pesquisa de mecanismos mais avançados e automatizados para assistirem o pessoal da operação na tomada de decisões (FLORES et al.,1997).

Examinando a literatura, constata-se a existência de várias referências que tratam de sistemas inteligentes aplicados à recomposição de sistemas de energia elétrica. Em KUZUYAMA et al.(1999) são apresentados os resultados de um levantamento feito em empresas de eletricidade japonesas mostrando que a maioria apontou o uso de sistemas inteligentes para o restabelecimento da operação de sistema elétrico. A pesquisa não se restringiu a puramente sistemas especialistas, mas inclui também redes neurais, sistemas *fuzzy*, algoritmos genéticos etc. e ainda a combinação destes entre si.

Em geral, as ferramentas mais completas são híbridas, utilizando também programas procedimentais para estimação de estados e/ou cálculo de fluxo de potência ótimo, assim podendo supervisionar o atendimento às restrições operacionais do sistema elétrico durante o restabelecimento.

Observa-se que uma categoria de procedimentos da inteligência artificial, que vem sendo bastante utilizada no desenvolvimento de formas de busca de solução, para o problema da recomposição, são os sistemas especialistas.

Os sistemas especialistas (ver Apêndice deste trabalho), de uma forma genérica, podem ser definidos como sendo um tipo de programa que utiliza um mecanismo similar ao raciocínio humano de especialistas em um determinado domínio para processar conhecimento e gerar soluções.

O potencial de um sistema especialista reside basicamente no conhecimento que ele engloba, pois quanto mais completa for a base de conhecimento, mais este programa se aproximará de um especialista humano. Em comparação o especialista humano apresenta como vantagem a capacidade de se adaptar a situações não previstas, já o sistema computacional não sofre influência por situações de cansaço físico ou emocional.

Nem todos os sistemas especialistas são necessariamente construídos tendo em vista igualar ou superar um especialista humano. Um sistema especialista pode também servir como um assistente inteligente em um processo de decisão. Sua função seria a de enumerar alternativas promissoras, possivelmente interagindo com o usuário, mas deixando o julgamento final para este.

Para que uma implementação seja possível é necessário fornecer ao computador uma base de conhecimento constituída por fatos e regras chamadas de "heurísticas" (KOJIMA et al.,1989) formadas a partir da experiência de um ou mais especialistas na área. Geralmente os problemas que não têm tratamento algorítmico e que envolvem variáveis simbólicas são os que melhor se adaptam a esta técnica.

A base de conhecimento, ou seja, as informações que o computador necessita para se portar como um especialista em determinado domínio, pode ser formada a partir de conhecimento adquirido da literatura técnica, manuais, e através de entrevistas com especialistas na área (WILLSON,1996).

A forma de representação do conhecimento heurístico mais comum são as regras do tipo "se" condição, "então" conclusão ou ação. Por exemplo, pode-se observar a regra abaixo:

SE: Tensão em um barra de carga está fora dos limites permitidos,

ENTÃO: Selecionar controle para corrigir o problema.

A base de conhecimento deve ser completa, ou seja, todos os casos devem ser cobertos; deve também ser simples, clara e consistente, para facilitar as etapas de verificação e validação e o entendimento por programadores que no futuro tenham que efetuar atualizações nesta base de conhecimento.

A interface com o usuário é responsável pela conexão entre o sistema especialista e o usuário, desde a etapa inicial, quando o usuário fornece uma meta, até a etapa final, quando o sistema explica ao usuário como chegou a determinada conclusão.

Os sistemas especialistas têm a vantagem de serem facilmente alterados (KOBAYASHI et al.,1993), retirando-se ou acrescentando-se regras na sua base de conhecimento, seja com o objetivo de corrigir algum problema detectado, de aperfeiçoar a sua atuação ou de atualização devido a mudanças no sistema sendo tratado. No entanto, testes devem sempre ser feitos para verificar a duplicação de regras, conflitos ou descontinuidade entre as mesmas.

SAKAGUCHI T. et al. (1983), propõem a utilização de um sistema especialista (*'knowledge based system'*) para restabelecimento de sistemas de potência. O trabalho, descreve um programa que utiliza recursos de computação simbólica, para o processo de raciocínio, aliados aos da computação numérica. A proposta consiste em calcular as restrições operativas do sistema de energia elétrica em tempo real durante a condução do

procedimento de restabelecimento. Os autores concluem, no entanto, que, apesar de os sistemas inteligentes estarem se tornando comuns no controle de sistemas de potência, a computação simbólica é muito lenta e a velocidade do raciocínio humano é muito maior, por isto, não era vantajoso, na época, se construir programas desta natureza para restabelecimento do sistema de energia.

Outra aplicação de sistemas especialistas em sistemas de potência é no treinamento de operadores de subestações e de despachantes nos centros de operação, pois além do seu processo de busca de solução ser similar ao humano, a sua capacidade de explicar como encontrou determinada solução para um problema torna este tipo de sistema particularmente didático (RAFIAN et al.,1996).

Na elaboração de um sistema especialista é fundamental recolher dados estratégicos à operação do sistema elétrico após uma perturbação (FINK et al.,1995) visando processar essas informações na elaboração de um grupo de regras para constituir processamento, donde saem ordens de comando para os operadores, os quais comandam as subestações locais atuando nos comportamentos estruturais dos processos locais (fase fluente) no sentido dos objetivos finais prescritos ou potencialmente identificadores de inovação relevante.

Tais soluções baseadas no conhecimento da operação de um sistema particular, muitas vezes não podem ser aplicadas para diferentes sistemas elétricos (KROST et al.,1999), já que as empresas e as redes de transmissão/distribuição possuem características particulares. Esta é a principal razão de não encontrarmos ferramentas comerciais para recomposição do sistema elétrico, como se encontra para outras aplicações.

Em alguns processos de recomposição não se pode observar informação em tempo real a partir das medições efetuadas, no sistema SCADA. Toma-se então necessário obter

informação interna através de um sistema híbrido, constituindo afinal uma combinação baseada no domínio de uma estratégia de recomposição, com base nas grandezas de entrada e de saída observadas do sistema (SPANEL et al.,1999). É evidente a importância da qualidade da informação a ser processada, o que exige muitas vezes a filtragem das informações, para eliminação ou redução dos erros, ou ainda um tratamento para possibilitar o processamento digital dos sinais, geralmente por amostragem.

O processamento de informação conseqüente tem por finalidade definir decisões. Num sistema de apoio à coordenação de restabelecimento de sistema elétrico baseado num modelo matemático, o processamento de informação reduz-se a uma "lei de controle" no caso analógico, ou num "algoritmo de controle", se houver computação numérica. Mas num sistema cognitivo, por natureza não matemático, o processamento de informação envolve codificação e decodificação de sinais, memória associativa e raciocínio, com algoritmos simbólicos (fatos e regras) e inclusive numéricos ou multivalorados pela lógica difusa.

Sob o aspecto mais geral, o processamento de informação faz intervir o processo a controlar juntamente com o respectivo controlador, de maneira que o desempenho seja satisfatório mesmo na presença de apreciáveis perturbações do sistema externo sobre a operação interna do sistema. Portanto, há necessidade de proceder a modos de "aprendizagem" e de "adaptação", características do controle inteligente: o modelo matemático, a lei de controle, a base cognitiva ou quaisquer outros mecanismos de controle devem adaptar-se autonomamente às mudanças do sistema por intermédio da identificação em tempo-real, aquisição de conhecimento, aprendizagem e raciocínio automático (KOSTIC ET AL.,1998).

ABIDI et al. (1999) propõem a utilização de sistemas inteligentes com programação orientada ao objeto, liberando o operador de tarefas rotineiras ou apoiando-o no processo de tomada de decisões, especialmente em condições de emergência, quando grande número de informações são fornecidas simultaneamente e o tempo de decisão é curto.

Outra aplicação das mais populares na área da operação de sistemas de elétricos de grande porte é o tratamento de alarmes (LIMA,1988).

ANDRADE et al.(1997) descrevem o desenvolvimento de um sistema inteligente de apoio ao despachante para o momento do restabelecimento. Este artigo constitui-se de um projeto conceitual que estabelece as diretrizes para o desenvolvimento da ferramenta inteligente de apoio ao despachante de FURNAS. A grande contribuição deste trabalho está nas informações a respeito dos requisitos funcionais exigidos pela concessionária para um trabalho desta natureza.

Outras pesquisas, cada vez mais sofisticadas, estão revelando facetas intrigantes que prometem dar respostas mais rápidas na recomposição de sistemas elétricos. Pesquisas recentes mostram que diante da complexidade na restauração de um sistema de potência , são cada vez maiores os riscos de um completo blecaute (AOKI et al.,1996), mas um rápido resultado na recomposição pode ser obtido com ajuda de sistemas baseados em conhecimento.

Em GAING et al. (1996) também é utilizada programação orientada ao objeto para desenvolvimento de uma ferramenta para auxílio à operação, gerenciando o volumoso número de informações envolvidas durante a recomposição, após o blecaute (SPANNER et al.,1996) no sistema de elétrico.

Considerando-se o processo de digitalização de subestações, verifica-se o momento propício à introdução de programas computacionais lógicos inteligentes que não permitam

ações equivocadas ou interpretações errôneas, ambas danosas ao sistema elétrico, ao equipamento ou ao operador (RIBEIRO,1993). Ainda é bastante presente na malha do controle restaurativo os operadores com respostas diversas às solicitações do sistema, ou seja, uma vez solicitados, eles podem seguir procedimentos diferentes para uma mesma ocorrência, arriscando o não cumprimento eficaz de suas importantes funções durante a recomposição.

Saber que eles podem ter esta ferramenta computacional como forte aliado abre uma frente otimista no desenvolvimento de outros sistemas como o apresentado em NAGASAWA et al. (1992), que propõe o uso de inferência fuzzy para prevenir erros humanos, melhorando o tempo de restauração, acumulando agilidade e confiança maior ao operador. Existem também autores (GIMENES et al.,1996) que acreditam ser possível futuramente a substituição completa de operadores de sistemas por programas de recomposição que automatizem esta tarefa na fase fluente. Para os centros de controle, essa constatação é importante porque apresenta a possibilidade de se ter uma centralização de um número cada vez maior de subestações, sem prejuízo no tempo de recomposição.

A aplicação de ferramentas inteligentes, sejam elas utilizando algoritmos genéticos (DELBEM et al.,1997,KOSTIC ET AL.,1996), redes neurais, lógica fuzzy ou sistemas especialistas é bem mais freqüente que a utilização de técnicas convencionais de otimização (HUANG et al.,1995) devido à dificuldade de formulação deste problema não-linear, que envolve grande número de restrições e variáveis lógicas associadas ao estado dos equipamentos de manobra.

Em SCARAMUTTI (1999), por exemplo é descrita a aplicação da técnica de algoritmos genéticos ao restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição, objetivando a maximização no atendimento de cargas prioritárias, através da transferência das mesmas,

com minimização do número de chaveamentos. Ao final do processo de otimização é fornecida a configuração a ser utilizada.

Para subsidiar a avaliação das necessidades de treinamento para operadores foram desenvolvidas pesquisas para determinar qual seria o nível de conhecimento dos operadores sobre os procedimentos para restauração do sistema (WILLSON,1996), já que no caso destes operadores (sistema norte-americano) as oportunidades de atuar em restauração são raras.

Os resultados deste tipo de pesquisa reforçam também a necessidade de se desenvolver ferramentas computacionais de apoio ao treinamento e atualização de operadores, em particular através do uso de simuladores (KOPIC, 1997; RAFIAN et al., 1996).

3.3 - CONCLUSÃO

A bibliografia consultada descreve, na sua maioria, implementações de sistemas inteligentes, especialmente sistemas especialistas como ferramentas de apoio ao restabelecimento de sistemas de energia elétrica. Foram abordadas algumas ferramentas utilizadas e conceitos importantes sobre controle restaurativo, identificando as características desejáveis da recomposição e otimização do sistema representando um auxílio efetivo no processo operativo. Tais características são de difícil implementação com o emprego das técnicas convencionais de programação, e talvez por essa razão, sistemas de recomposição não tenham acompanhado a evolução dos centros de controles nas últimas décadas.

A complexidade da recomposição do sistema elétrico leva as empresas, em conjunto com o Operador Nacional do Sistema, a efetuarem vários estudos em regime permanente e de transitórios que exigem um grande número de análise de situações, envolvendo diferentes topologias e períodos de carga. Estes estudos geram instruções de operação na forma de regras de produção, o que facilita a formação da base de conhecimento de um sistema especialista.

Embora sejam muitos os trabalhos que abordam o assunto de restabelecimento do sistema de energia elétrica e sistemas especialistas aplicados ao controle destes, nota-se a falta de uma referência que organize tal conhecimento de forma a permitir a sua aplicação direta de acordo com as particularidades de cada sistema, principalmente as características do sistema elétrico brasileiro.

Baseado nisto surge a possibilidade de elaboração de um sistema especialista especialmente desenvolvido para auxiliar os operadores na recomposição durante a fase fluente, satisfazendo necessidade de agilização da operação.

As técnicas de engenharia do conhecimento são efetivamente aplicáveis a restauração de grandes sistemas de potência, podendo trazer maior velocidade, flexibilidade e segurança para a restauração destes sistemas.

4 - DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA APOIO AO RESTABELECIMENTO

4.1 - INTRODUÇÃO

Na última década, seguindo a tendência global de modernização dos sistemas de comando e controle, vem sendo implantada a automatização nas unidades de transmissão das empresas no setor elétrico brasileiro. Esta tem seguido o caminho mais natural, iniciando com a teleoperação de unidades através de centros de operação de estações (COE) e evoluindo com a implantação de programas nos computadores localizados em cada unidade, que cumprem automaticamente as rotinas de operação, minimizando a relação de equipamentos a operar por operador remoto.

A chamada “automação de subestações”, com a retirada de operadores das subestações menores, tem resultado no aumento da complexidade da solução dos problemas relacionados à sua operação pelos COEs. Principalmente na fase fluente de recomposição, as decisões para definir as ações de restabelecimento mais adequadas podem se tornar extremamente difíceis para o operador devido ao maior número de subestações controladas por ele.

A utilização de técnicas de inteligência artificial na elaboração de ferramentas computacionais propiciou a implementação de um sistema para auxiliar o operador no restabelecimento das subestações automatizadas e teleoperadas pelos COEs.

O desenvolvimento deste sistema, de apoio ao restabelecimento, se deu a partir do interesse da COPEL (Companhia Paranaense de Energia) na elaboração de uma ferramenta que apoiasse o operador durante o restabelecimento, já que o processo de recomposição adotado na empresa baseia-se preferencialmente na filosofia de recomposição fluente, que visa o restabelecimento autônomo de subestações e usinas, dispensando o uso dos meios de comunicação entre as unidades, a não ser quando não são atendidas as condições necessárias à esta autonomia.

A concepção desta ferramenta de apoio ao restabelecimento partiu da consideração das características do problema que foram definidas nos capítulos anteriores. São definidas as formas de conhecimento a serem utilizadas no sistema de apoio ao restabelecimento dos COEs na fase fluente, as regras para se efetuar o restabelecimento e qual deve ser a melhor ferramenta para se executar tal tarefa.

No início do desenvolvimento deste trabalho, julgou-se necessário verificar a interação do despachantes do Centro de operação do Sistema (COS) e o operador do centro de operação de estações (COE) e, de fato, obtiveram-se deste relacionamento algumas idéias interessantes e, também, uma noção geral de como o restabelecimento do sistema elétrico da Copel é tratado por eles durante e após perturbações.

Na concepção deste trabalho, entre a definição das idéias iniciais e a implementação final, algumas diretivas foram alteradas mas, como o sistema foi desenvolvido a partir das normas de recomposição do sistema da COPEL, o mesmo encontra-se bastante ajustado à aplicação concreta nas condições de restabelecimento do COE regional de Ponta Grossa da COPEL. No trabalho, o sistema especialista foi adaptado para atender ao COE de Ponta Grossa mas pode ser facilmente modificado para atender outros COEs da COPEL. Necessitando somente de programação das novas regras de

recomposição fluente específicas do outro COE. O desenvolvimento de sistemas especialistas na maioria das vezes leva à inclusão na base de conhecimento de informações específicas sobre o sistema teste empregado.

4.2 - SISTEMA TESTE UTILIZADO

A operação da COPEL, Companhia Paranaense de Energia, uma empresa integrada de geração, transmissão e distribuição, conta com 09 (nove) centros de operação de estações hierarquicamente subordinados ao Centro de Operação do Sistema, controlando um total de 111 (cento e onze) subestações de transmissão nível de tensão maior ou igual a 69 kV, as quais são distribuídas geoeletricamente no estado, conforme Figura 2.

Para a operação das subestações de transmissão, visando manter um fornecimento de energia com qualidade, a empresa manteve até o início da década de 90 um sistema de operação manual e local, dependente de operadores e, ocasionalmente, de alguns automatismos executados através de lógica de relés.

Naturalmente, foram implantados nestas unidades procedimentos padronizados para os processos controlados (recomposição, controle de tensão e controle de frequência). Em particular, para o processo de recomposição, desde 1973 foi adotada uma filosofia bem definida, diferenciando sua execução nas etapas fluente e coordenada e tornando-as o mais possível desvinculadas, sob a ótica do executante na subestação (GIMENES et al.; 1996).

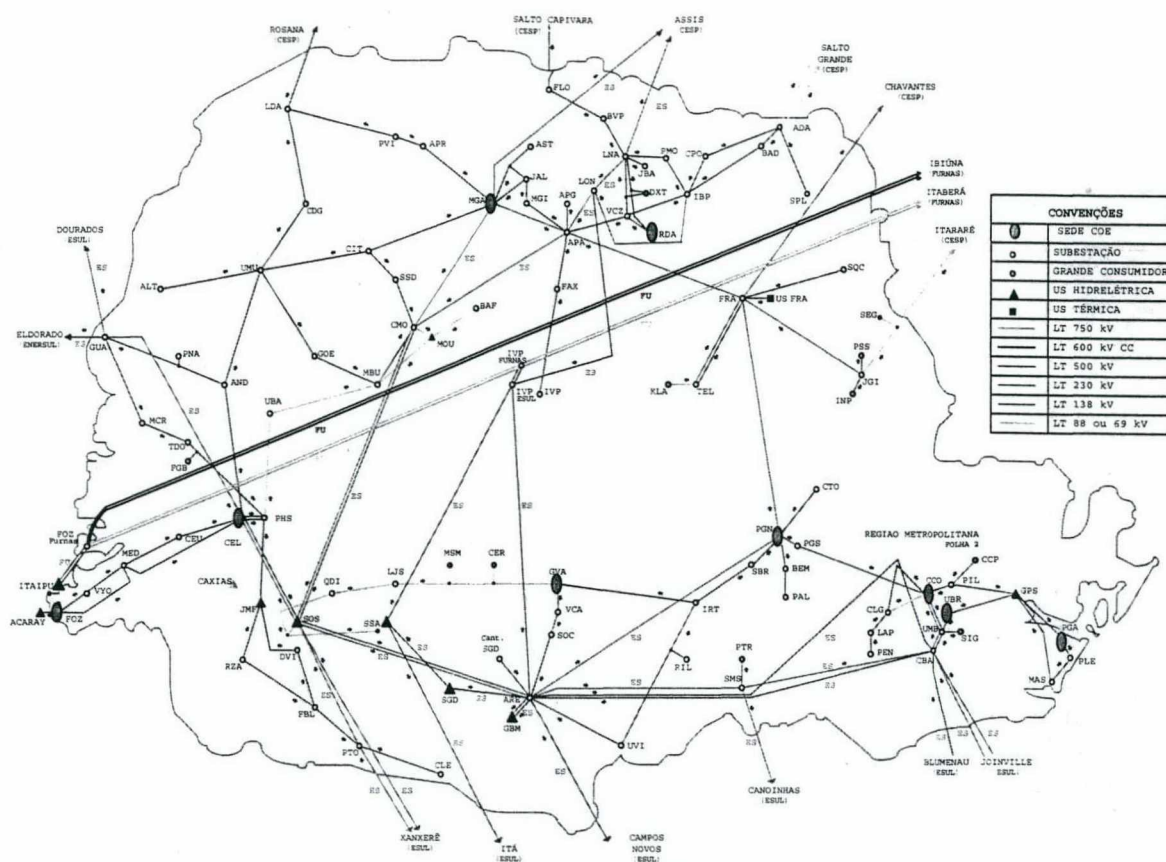


Figura 3-Sistema COPEL

Decorridos mais de 20 anos de operação o processo de recomposição, realizado de acordo com a filosofia descrita consagrou-se como o mais adequado para a COPEL e vem sendo mantido, através de uma rotina de elaboração/atualização de normas e de treinamento de operadores.

Foi adotado como caso exemplo para implantação deste trabalho o centro de operação de estações de Ponta Grossa que teleopera 04 (quatro) subestações de 138 kV e 02 (duas) subestações de 230 kV (diagrama figura 4), todas sem operadores, e o restabelecimento das Subestações é feito, pelos operadores do COE, com o auxílio das Instruções de Operação (NORMA TÉCNICA COPEL;1987).

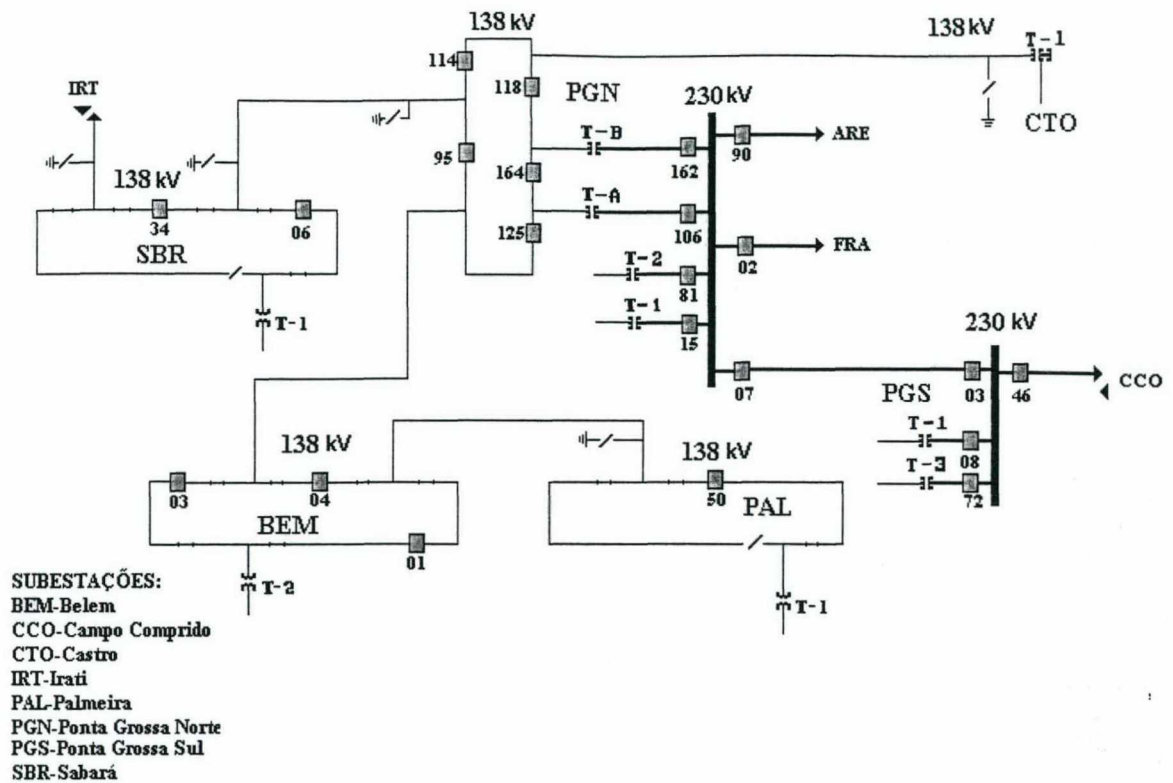


Figura 4-Diagrama COE-PGO

A elaboração dessas instruções para a recomposição do sistema após um distúrbio parcial ou completo, é feita a partir de inúmeras simulações empregando programas de fluxo de potência e de estudos de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. O resultados destes estudos é a definição uma seqüência preferencial de ações de controle, de acordo com o conhecimento das características do sistema elétrico.

O Centro de Operação de Estações de Ponta Grossa (COE-PGO) na forma como está estruturado contém individualmente uma instrução de recomposição para cada subestação por ele teleoperada. Praticamente toda a recomposição é fluente, cabendo ao operador do COE a tomada de decisão dentro das diretrizes.

Nestas instruções estão contidos também procedimentos para recomposição nos casos de contingências, que possam por em risco a continuidade da recomposição, por perda de circuitos imprescindíveis ao sistema.

4.3 - ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA IMPLEMENTADO

A avaliação dos aspectos relativos ao COE-PGO, principalmente daqueles relacionados aos planos de restabelecimento já existentes, levou a se optar, numa primeira etapa de projeto, por desenvolver um sistema especialista que atuasse como guia ao operador, aliviando as pressões emocionais a que este fica submetido, diminuindo a possibilidade de erros e o tempo total de restabelecimento. Posteriormente poderá se desenvolver uma recomposição automática das subestações do COE por um programa de computador, similar a este, baseado na filosofia de recomposição fluente atuando sobre a subestação através de um sistema de supervisão, controle e aquisição de dados, executando manobras de preparação e recomposição de circuitos, conforme previsto nas instruções de recomposição da unidade, sem necessidade do operador. Para tanto o programa terá que sofrer antes extensivos testes para validação final da ferramenta.

O Sistema de recomposição (RECOMP), assim gerado para ser uma ferramenta de apoio ao operador, foi baseado no plano ditado pelas Instruções de Operação (IO) da COPEL, instruções estas estabelecidas pelas equipes de estudo da empresa. A análise detalhada das IO identificou possíveis estruturas baseadas em regras do tipo “Se abrir tais disjuntores, Então adotar os procedimentos para gerar as seqüências de ações de controle.”

Tais informações serviram de base para caracterizar o tipo de sistema especialista a ser desenvolvido. Para atender os objetivos propostos, o RECOMP possui propriedades que permitem:

- Simplicidade na utilização;
- Rapidez de execução;
- Facilidade de alteração das regras, ocasionadas por futuras ampliações das subestações, ou mesmo mudança no sentido de recomposição.

Adicionalmente, procurou-se no desenvolvimento da ferramenta dotá-la de características gerais, em situação real de restabelecimento, como guia ao operador e capaz de permitir com relativa facilidade de sua evolução futura a sua adaptação no sistema de automação da COPEL.

A seqüência de ações ditada pelas instruções operacionais indica a utilização de um sistema especialista baseado em regras. Há várias alternativas de plataforma de programação para desenvolvimento de sistemas desta natureza. Dentre elas, optou-se pelo uso de uma plataforma de programação (*shell*) de domínio público, desenvolvido pelo Laboratório de Inteligência Artificial da Universidade Federal do Ceará e denominado Expert SINTA. Este software é uma biblioteca de componentes para programação de sistemas especialistas baseados em regras de produção, fatores de confiança e encadeamento para trás (vide apêndice). Por possuir algumas facilidades em relação à programação em linguagem tipo PROLOG ou LISP, tais como editor de regras e recursos gráficos para interface com o usuário, o seu uso torna mais simples o desenvolvimento de um protótipo para pesquisa. No entanto, há limitações para interface com outras linguagens e suporte técnico.

Conforme indicado nas instruções operacionais, para que o restabelecimento seja executado com sucesso, é importante que as ações sejam tomadas seguindo uma seqüência pré-determinada, o que garante as condições necessárias para se realizar ações futuras. As ações, portanto, não devem ser executadas antes do momento correto, mesmo que as premissas de determinada regra sejam todas satisfeitas. Criou-se, então, uma prioridade das regras.

O RECOMP utiliza o encadeamento para trás, o modo mais comum de utilização de um sistema especialista. Nesta forma de encadeamento o sistema parte de uma meta , estabelecida no programa, como o fechamento de todos os disjuntores abertos com a ocorrência . A máquina de inferência durante o processo instancia as variáveis de forma a satisfazer as premissas das regras e então executa as conclusões. Se na seqüência do processamento, os valores instanciados anteriormente não satisfizerem novas condições, o mecanismo de inferência utiliza o retrocesso (backtracking) para buscar alternativas. Caso o atributo procurado não seja encontrado em nenhuma conclusão de regra, uma pergunta direta é feita ao usuário. No sistema especialista elaborado, as regras possuem, no corpo de sua definição, a próxima regra a ser verificada, criando assim o encadeamento necessário. A sintaxe das regras de inferência, suas normas de formação e suas particularidades são descritas detalhadamente no item 4.4.

A sintaxe utilizada na formulação das regras é praticamente direta, sendo possível, a partir das instruções de operação, formulá-las com facilidade.

4.4 - BASE DE CONHECIMENTO

O RECOMP utilizou a arquitetura mais comum de sistemas especialistas que é a que envolve regras de produção (production rules) proporcionada pela plataforma Expert SINTA. Essas regras são simplesmente um conjunto de condições no estilo SE... ENTÃO..., com a possibilidade de inclusão de conectivos lógicos relacionando os atributos no escopo do conhecimento, como vemos no exemplo a seguir o modelo da regra escrita no Expert SINTA:

```

SE  SUBESTAÇÃO=PGN
E   Desligamento <> geral 138 kV
E   Disjuntor abriu PGN = 52-125
E   Disjuntor abriu PGN <> 52-95
OU  SUBESTAÇÃO=PGN
E   Desligamento <> geral 138 kV
E   Disjuntor abriu PGN = 52-125
E   Disjuntor abriu PGN <> 52-164
OU  SUBESTAÇÃO=PGN
E   Desligamento <> geral 138 kV
E   Disjuntor abriu PGN = 52-125
E   Disjuntor abriu PGN <> 52-106
ENTÃO
      Fechar disjuntores conforme sequência=52-125 PGN

```

Legenda:

<> diferente

= igual

Para atender aos requisitos operacionais deste sistema teste, foram implementadas o em torno de quarenta de regras. Desta forma, na sua criação, tratam-se de trabalhar somente com a representação do conhecimento através das regras obtidas nas instruções

operacionais, deixando para a plataforma Expert SINTA a tarefa de interpretar o conhecimento representado e executá-lo em uma máquina de inferência, além de permitir depurações e explicações de como o computador chegou àquela conclusão.

Outra questão deve ser levada em conta durante o acompanhamento da execução do Expert SINTA é que deve-se definir anteriormente se cada variável pode ter apenas uma instanciação (univalorada) ou múltiplas (multivaloradas) recebendo vários valores em uma única consulta ao sistema.

4.5 - EXEMPLOS DE RESULTADOS

Para o sistema teste foi escolhido um caso exemplo de recomposição, propositadamente no nível de tensão 230 kV, por se tratar de uma recomposição de grande importância para o COE-PGO e para sistema interligado, que em certas circunstâncias será necessário acionar o COS, passando então a recomposição a coordenada.

Em um primeiro exemplo foi simulando a abertura de disjuntores nas subestações SE-PGN e SE-PGS conforme diagrama mostrado na figura 5.

O programa apresenta uma tela de abertura, para ativá-lo clica-se em consulta, e em seguida na opção iniciar, ou pressiona-se o ícone correspondente abaixo de consulta.

Neste caso, já na segunda regra o mecanismo de inferência apresenta ao usuário uma pergunta sobre em quais subestações do COE-PGO houve ocorrência, conforme mostra figura 6.

Novamente, a premissa da segunda regra contém uma variável desconhecida pelo RECOMP e o programa dispara a primeira regra, perguntando ao usuário quais foram os disjuntores que abriram na SE-PGN conforme mostra a figura 7:

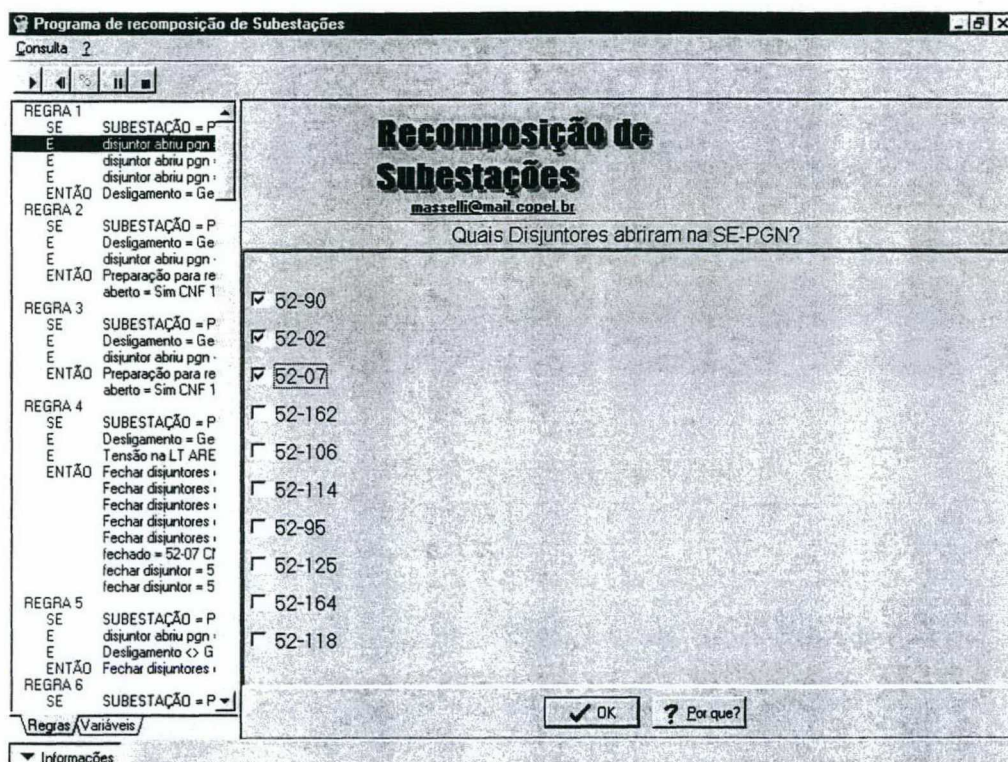


Figura 7

Neste caso indica-se a abertura dos disjuntores das linhas da barra 230 kV da SE-PGN. A máquina de inferência caminha pela árvore de busca e após disparar outras regras é apresentado ao usuário a lista de manobras necessárias para preparação da subestação para recomposição. O programa recomendará a abertura de outros dois disjuntores dos transformadores para preparação da referida SE, conforme recomenda as instruções de operação (figura 8):

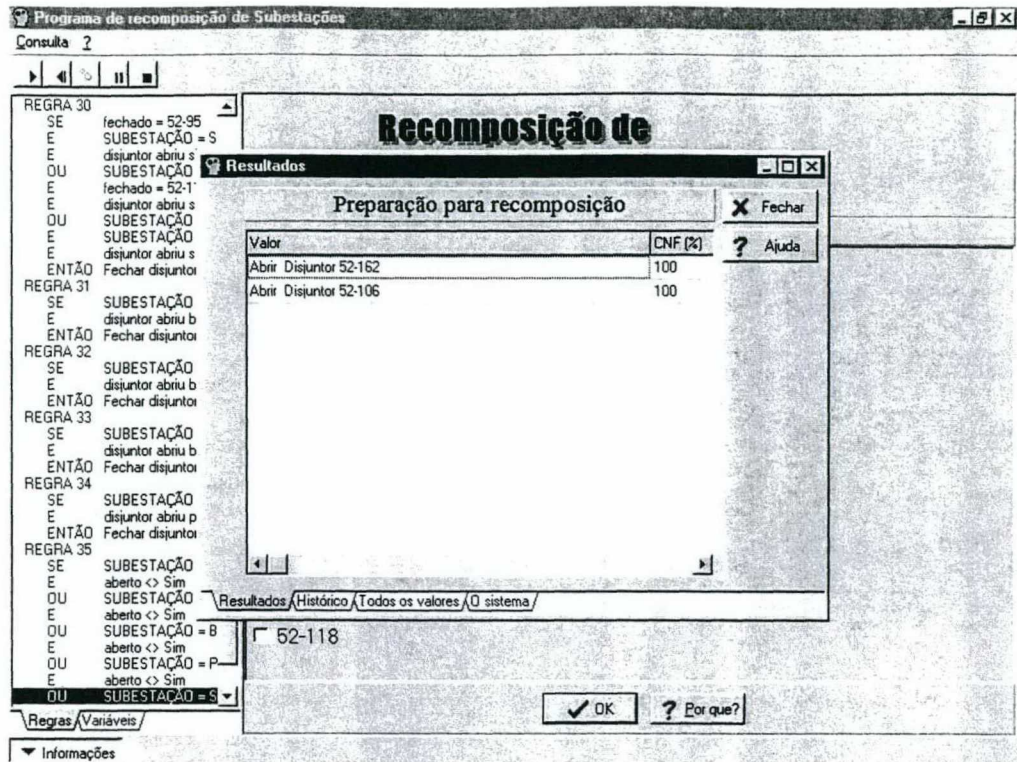


Figura 8

Após realizada esta ação, podemos verificar na figura 9 abaixo a abertura dos disjuntores solicitados pelo programa. Observa-se também a separação das áreas de 138 kV (energizada) da área de 230 kV.

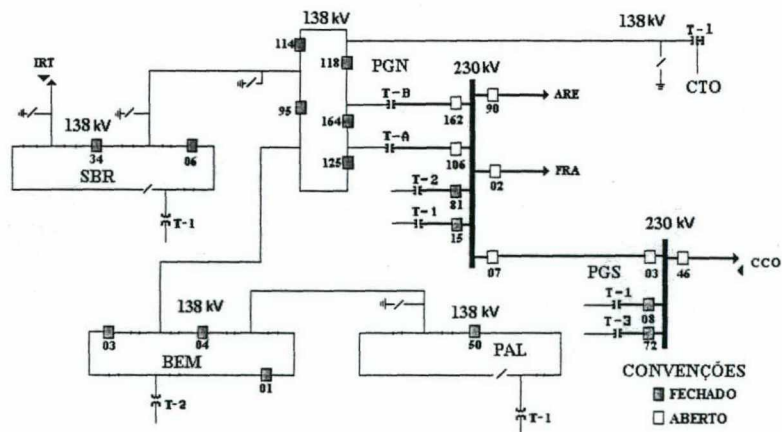


Figura 9

Ao pressionar o botão **Fechar** na janela de preparação para recomposição a seqüência continua. A SE-PGN tem como restrição para recomposição fluente a alimentação a partir da LT 230 kV de Areia-Eletrosul. O programa perguntará também ao usuário se há tensão na linha AREIA, satisfazendo uma das condições impostas pelas normas de recomposição. Se o usuário responder **Não** (não há tensão na linha Areia) o processo de recomposição fluente será interrompido. A recomposição somente poderá ser feita com autorização do COS (fase coordenada) com tensão nas linhas Ponta Grossa Sul, Figueira ou da área 138 kV, dependendo da condição do sistema interligado naquele momento.

No caso exemplo respondeu-se que **Sim** (figura 10):

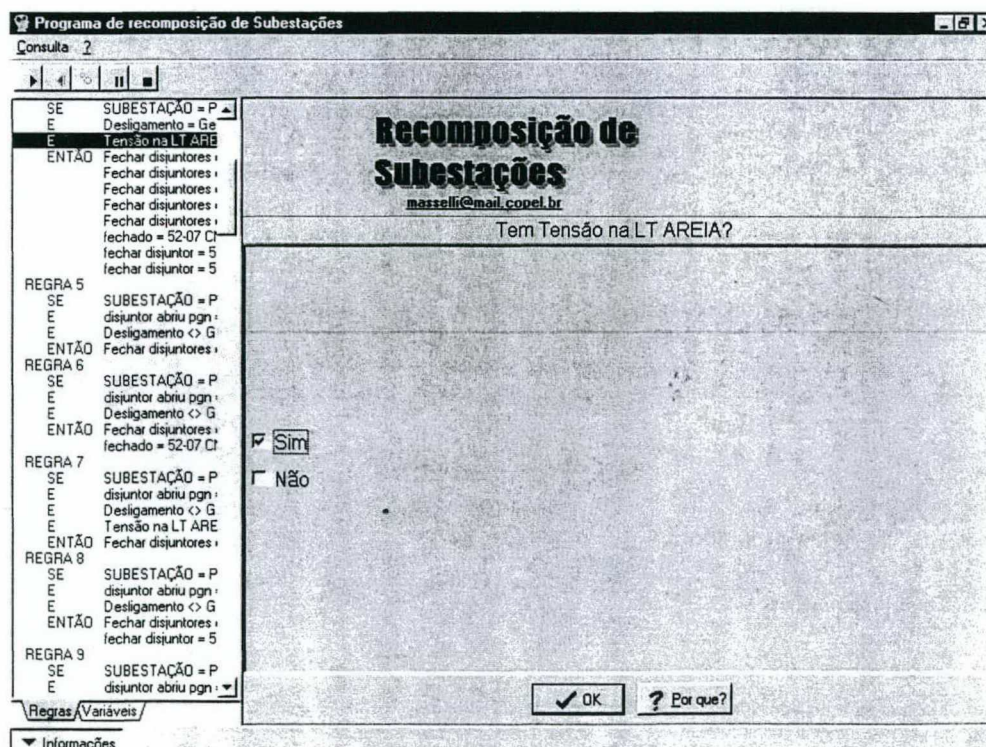


Figura 10

Dando continuidade ao processo de recomposição o programa fará as mesmas indagações, sobre a SE-PGS (Figura 11).

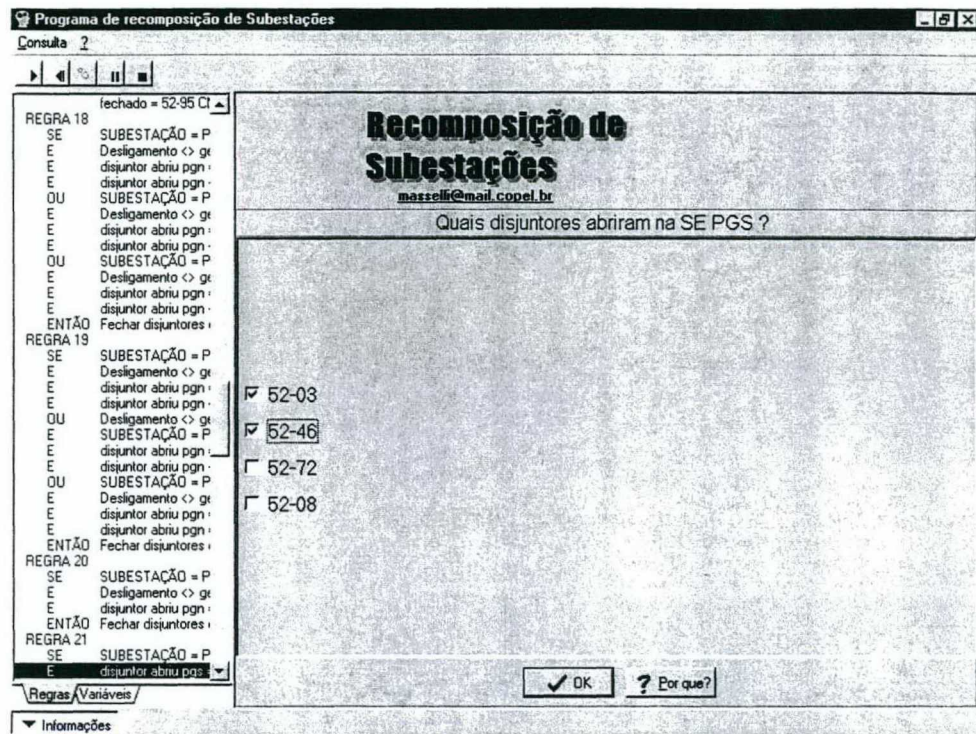


Figura 11

Após responder esta informação, o programa fará uma pergunta sobre a linha que vem da SE Campo Comprido (figura 12), Este caso é similar à recomposição da SE PGN, pois caso não haja tensão na linha, não será possível a recomposição fluente e o usuário necessitará de um contato com o COS para uma recomposição coordenada.

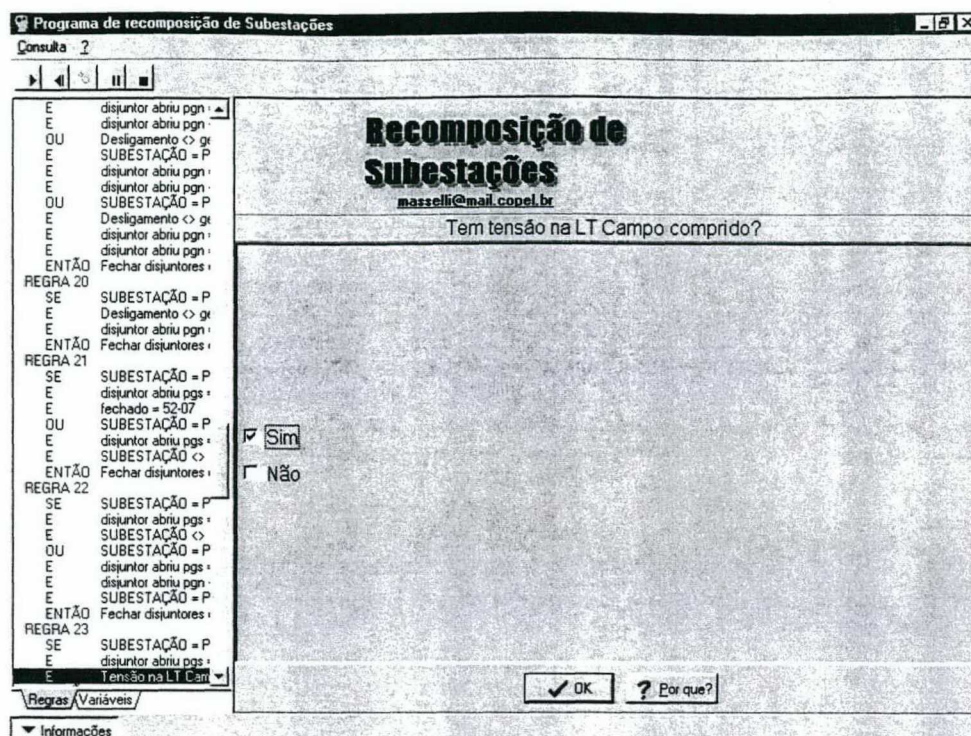


Figura 12

Ao responder que **Sim**, finalizando, abrirá uma janela com os resultados mostrando a seqüência dos disjuntores a serem fechados conforme figura 13.

No resultado são apresentados todos os valores atingidos pela variável objetivo no programa. É mostrada uma lista de disjuntores que deverão ser fechados pela seqüência determinada proporcionando a correta recomposição fluente, conforme norma de recomposição, do COE-PGO.

Nas linguetas localizadas na parte inferior da janela de resultados há a opção **Histórico** que é de grande valia para o usuário, onde é mostrada toda árvore de pesquisa percorrida para o programa alcançar o objetivo final (ver figura 13).

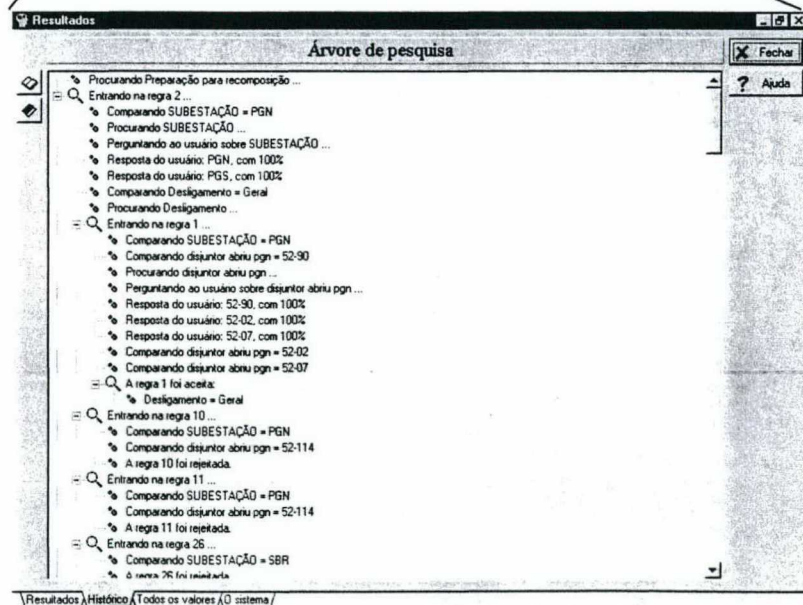
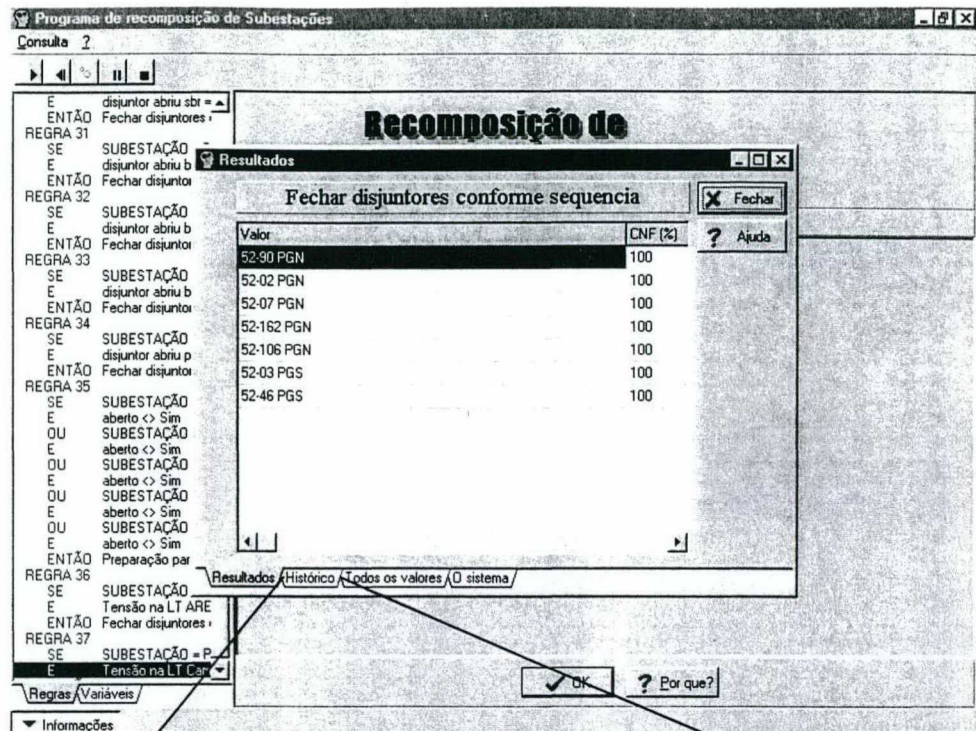


Figura 13

4.6 - CONCLUSÃO

O desenvolvimento do projeto chegou a um ponto em que o único questionamento à sua exeqüibilidade, da existência de erros na base de conhecimento ou situações não previstas. Fazia-se necessário testar o sistema em campo, e esta atividade foi executada de maneira programada no COE-PGO. O programa passou por uma bateria de testes pelos operadores para verificar principalmente se não existiam erros na recomposição sugerida pelo sistema em relação as norma de recomposição das subestações.

Para avaliar os testes considerou-se que o programa produzido atenderia às necessidades se fosse capaz de sugeriras mesmas ações que um operador com conhecimento das normas de recomposição da unidade sugeriria. O programa imitou o raciocínio humano em diversas situações propostas, sugerindo ações, provavelmente, na mesma seqüência.

O RECOMP poderá aumentar a rapidez e segurança do processo de restabelecimento pois reduz a possibilidade de erros de operação causados pela complexidade e do grande numero de normas técnicas que o operador tem que conhecer e atuar com rapidez na recomposição. Nos procedimentos atuais estes erros são praticamente inevitáveis dada a pressão emocional no momento do restabelecimento no qual exige de um preparo melhor do mesmo.

Notou-se também que o esquema utilizado no processo de inferência é muito rápido, e se as instruções apresentadas pelo sistema especialista forem seguidas corretamente pelo usuário, o processo de restabelecimento chegará ao final com sucesso.

A interface com o usuário é amigável, facilitando a troca de informações e uma outra vantagem observada é a sua utilização para treinamento e atualização do pessoal de operação.

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Este trabalho representa mais um passo no desenvolvimento de ferramental que utiliza técnicas de Inteligência Artificial para a operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), cujo objetivo final é a busca constante da otimização das ações e procedimentos de supervisão e controle da operação do SEP.

O Sistema Especialista desenvolvido, RECOMP, foi concebido e estruturado visando ser bastante abrangente no que diz respeito à sua aplicação em diferentes COEs. Após alguns questionamentos iniciais aos operadores sobre a situação de contingência das SEs e, considerando o conjunto e a seqüência dos disjuntores operados, o RECOMP analisa, utilizando técnicas de sistemas especialistas, a seqüência ideal, conforme norma de recomposição, para o restabelecimento.

Merece destaque o fato do RECOMP ter sido implementado utilizando a plataforma Expert SINTA, possibilitando ser posteriormente compilado dentro do ambiente Borland Delphi em qualquer versão. Um estudo preliminar dos critérios e regras de restabelecimento das SEs possibilitaram sua implementação, garantindo maior flexibilidade quanto à expansão e implementação de modificações operacionais, além de ter permitido arquitetar uma base de conhecimento na qual se encontram representadas, de forma estruturada, todas as regras de recomposição e a filosofia de restabelecimento automático de uma SE.

O RECOMP, neste primeiro protótipo, não garante isoladamente o sucesso de um restabelecimento automático de um COE. A implementação deste conjunto de idéias, deve

ser acompanhada da interação com o operador, o qual fornece informações e implementa a seqüência de manobras apresentada pelo sistema especialista.

No desenvolvimento e testes do RECOMP, identificou-se uma certa limitação na plataforma Expert SINTA utilizada, principalmente na interface com outros programas. Isto possibilitaria a integração do sistema especialista com um simulador de sistemas de potência. Mas com o desenvolvimento e a integração desta ferramenta de forma automática, integrada ao sistema de aquisição de dados, será possível o acompanhamento das alterações da malha e na dinâmica do processo de recomposição de SEs. Deste modo, as ações de restabelecimento poderiam ser tomadas automaticamente, não havendo necessidade de envolver o elemento humano.

Listam-se os principais benefícios do RECOMP:

- Apresenta regras que são armazenadas independentemente, o que permite sua alteração conforme mudança nas normas de recomposição ou alterações no sistema;
- Pode ser usado como uma ferramenta de treinamento do quadro de operadores;
- Existe facilidade de mudança da interface com o usuário;
- Permite desenvolver a sensibilidade dos usuários quanto à importância e amplitude dos benefícios que podem ser obtidos com a utilização de sistemas especialistas, criando-se uma nova dimensão para a pesquisa e o desenvolvimento de programas para a solução de problemas convencionais do SEP.

- Apoio em situações de emergência, quando a velocidade de chegada de dados é elevada, os operadores de SE tendem a atingir a barreira cognitiva, o que dificulta o diagnóstico do problema e a definição da estratégia de ação (CASAMATTA et al.,1999);
- Promove a padronização e uniformidade das ações de restabelecimento;
- Proporciona a redução das ações humanas errôneas;
- Confere rapidez na definição e implementação das ações de restabelecimento;
- Reduz a carga de trabalho do operador;
- Funciona como suporte de conhecimento para operadores pouco experientes e como lista de verificação do plano de recomposição fluente para operadores experientes;
- Diminui a influência de eventuais pressões psicológicas sobre o operador na tomada de decisões;
- Viabiliza a automação da Subestação e o processo de desassisti-la.
- Pode contribuir para diminuir o índice de duração de interrupção de energia aos consumidores (DEC) uma vez que promove a otimização do restabelecimento.

Identificam-se as seguintes limitações no estágio atual do RECOMP:

- A sua atuação é restrita dentro da recomposição fluente;

- Dificuldade de se garantir que a base de conhecimento é precisa e completa;
- Ausência de interface com linguagens procedurais e de cálculo numérico.
- Plataforma Expert SINTA com suporte deficiente;

Horizontes e Áreas de Potenciais – Perspectivas:

No presente momento existem vários Sistemas Especialistas desenvolvidos nas diversas áreas de operação e planejamento e operação de SEP .

As áreas potenciais para a aplicação de Sistemas Especialistas em operação de SEP são:

- Controle e despacho de carga e geração;
- Controle de tensão;
- Análise da estabilidade;
- Esquemas de alívio de carga e de geração;
- Diagnóstico de falhas e defeitos;
- Restabelecimento de redes (sistemas);
- Determinação de estratégias corretivas para estados de emergência operativa em Centros de Operação;
- Treinamento (Simuladores);
- Interface amigável com o conjunto de programas numéricos de análise de rede.

Como sugestão para trabalhos futuros e expansão do RECOMP ficam:

- A implementação da capacidade de explanação do raciocínio;
- A evolução do RECOMP para operar a partir de informações obtidas da rede e não das fornecidas pelo usuário;
- Implementação em plataforma real;
- Adaptação do RECOMP para sua utilização como ferramenta de treinamento (Sistema Tutorial Inteligente).

Os Sistemas Especialistas constituem um instrumento valioso no processo de aprimoramento da decisão humana, que minimiza ou elimina a necessidade de operadores humanos, mas para o seu sucesso e eficácia devem ser bem definidos e formulados, descrevendo todos os aspectos técnicos do problema e todo o conhecimento específico da área de aplicação.

A aceitação do usuário deve ser examinada e exaustivamente perseguida durante todas as fases do desenvolvimento. As interfaces com o usuário desempenham um fator importante e devem ser bem estruturadas.

APÊNDICE I - FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

I.1- INTRODUÇÃO

Toda a pesquisa relacionada a robôs, processamento da linguagem natural e sistemas tomadores de decisão é chamada investigação ou estudo de inteligência artificial (IA).

A parte da inteligência artificial que procura habilitar computadores para que possam analisar problemas e sugerir soluções da maneira como faria um especialista na área é chamada "sistemas especialistas", ou mais especificamente "sistemas especialistas baseados no conhecimento" (HARMON, KING; 1985). Para tanto é necessário fornecer ao computador uma base de conhecimento constituída por fatos e regras chamadas de "heurísticas" formadas a partir da experiência de um especialista da área.

Geralmente os problemas que não têm tratamento algorítmico tais como os de interpretação, previsão, diagnósticos, projeto, treinamento, controle, etc., são os que melhor se adaptam a esta técnica. No caso de sistemas de potência a maior parte das aplicações se encontram nas categorias de monitoramento e controle em tempo real (DILLON, LAUGHTON; 1990), as quais visam dar apoio a despachantes nos centros de controle, evitando problemas causados por decisões tomadas sob pressão por pessoas nem sempre com experiência suficiente.

A diferença básica entre sistemas especialistas e os programas tradicionais é que os primeiros manipulam conhecimento e os segundos dados. Em sistemas especialistas o

conhecimento específico para a resolução do problema é estabelecido como uma entidade separada, ou base de conhecimento, e não implicitamente, misturado à codificação do problema.

Algumas das vantagens do sistema especialista são a permanência e a consistência. Especialistas humanos são influenciados por situações externas ao problema, e mesmo de ordem pessoal, podendo tomar decisões diferentes para a solução do mesmo problema em diferentes ocasiões. Embora especialistas humanos tenham a vantagem de ver o problema em um contexto maior, enquanto sistemas especialistas, pelo menos até o momento, tendem a visualizar o problema em um horizonte limitado, estes últimos não se cansam, não se distraem e nem precisam de treinamento para manter sua eficiência. No aspecto manutenção os sistemas especialistas também apresentam vantagens pois, devido a sua modularidade, estes sistemas são mais fáceis de se modificar que programas em linguagem procedimental desde que, obviamente, a pessoa responsável pela tarefa tenha alguma experiência com a linguagem ou *shell* utilizado no sistema.

I.2 – ESTRUTURA E ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

Para que seja possível o desenvolvimento de um sistema especialista é essencial que se obtenha e organize o conhecimento. A base de conhecimento, ou seja, as informações que o computador necessita para se portar como um especialista em determinado domínio, pode ser adquirida de literatura técnica, manuais e através de entrevistas com um ou mais especialistas na área. A aquisição do conhecimento não é uma tarefa simples, por vários motivos entre os quais podemos citar:

- o conhecimento deve ser completo, ou seja, todos os casos devem ser cobertos;

- o conhecimento deve ser expresso com simplicidade, pois regras simples são mais fáceis de entender e fazer manutenção do que regras complexas (IEEE PES; 1993);

- a base de conhecimento deve ser elaborada de maneira clara e consistente para evitar trabalho extra na etapa de verificação e validação ou em uma eventual manutenção.

As formas mais utilizadas para aquisição de conhecimento são entrevista, observação do especialista em atuação, simulação de cenários, etc.

A etapa seguinte no desenvolvimento dos sistemas especialista é a representação do conhecimento. A base de conhecimento de um sistema especialista é composta de fatos e relacionamentos que podem ser representados de diversas maneiras, entre as quais incluem-se: redes semânticas, frames, triplas objeto-atributo-valor, expressões lógicas e regras.

As regras são o tipo mais popular de representação do conhecimento (WATERMAN; 1986), e apropriado ao domínio formado a partir da experiência que os especialistas desenvolvem resolvendo problemas na área de sistemas de potência, por exemplo. Elas são úteis para traduzir o conhecimento organizado na forma premissa/conclusão ou situação/conclusão, e são estruturadas da forma IF-THEN.

A fim de obter-se um sistema especialista é necessário, além da base de conhecimento, um motor de inferência, como pode ser observado na figura I.1. A base de conhecimento contém fatos (dados) e regras, e o motor de inferência contém um interpretador, que decide como, e um organizador, que decide quando e em que ordem aplicar diferentes partes do domínio de conhecimento (WATERMAN; 1986), procurando dar uma solução ao problema. A separação entre a base de conhecimento e o motor de inferência é uma das características básicas dos sistemas especialistas.

O mecanismo de inferência pode ter busca com encadeamento para frente ou para trás. No encadeamento para frente, também chamado de direcionado pelos dados, cada regra é casada com dados ou fatos da memória de trabalho, e as regras cujas condições são satisfeitas são disparadas. No encadeamento para trás, também chamado de direcionado por metas, uma hipótese é formada e o conjunto de regras é pesquisado para tentar provar que a meta é verdadeira.

A interface com o usuário (ver Figura I.1) é responsável pela conexão entre o sistema especialista e o usuário, desde a etapa inicial, quando o usuário fornece uma meta, até a etapa final quando o sistema explica ao usuário como chegou a determinada solução.

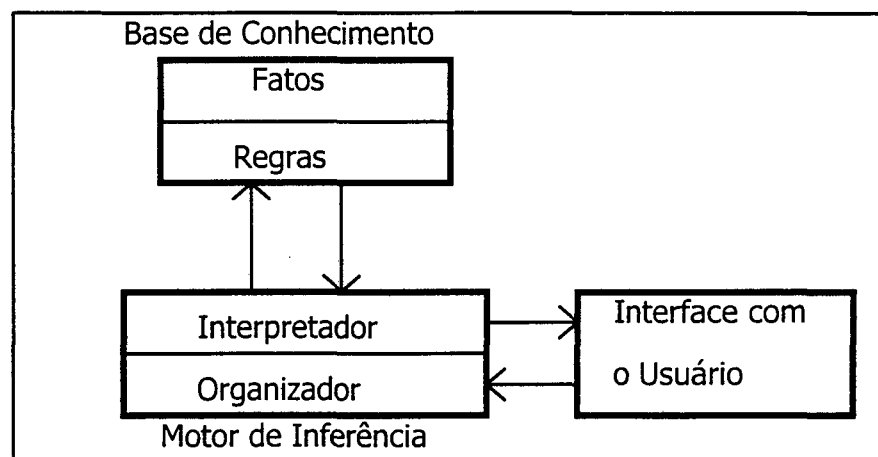


Figura I.2 - Estrutura de um Sistema Especialista

Embora sistemas especialistas possam ser construídos em linguagens convencionais como C ou FORTRAN, estas linguagens apresentam desvantagens em relação às estruturas de representação de conhecimento. Por este motivo o desenvolvimento de sistemas especialistas em linguagens mais apropriadas, tais como o PROLOG ou o LISP, simplifica a sua construção. Outra opção são os *shells*, os quais podem ser compreendidos como sistemas especialistas prontos, mas com a base de conhecimento vazia, e por já incluírem

várias facilidades, como interface com o usuário, capacidade de explicar como chegou a determinada decisão (processo de inferenciação), ferramentas gráficas, etc, tornam mais simples o trabalho inicial de formação de um protótipo. No entanto, podem apresentar alguma limitação quanto à forma de representação do conhecimento, mecanismo de inferência e velocidade de processamento. Alguns exemplos de *shell* são: NEXPERT, KAPPA, GENESIA.

Uma etapa que consome bastante tempo dos engenheiros de conhecimento é a de verificação e validação dos sistemas especialistas.

Muitas vezes o especialista que participou da etapa de aquisição do conhecimento também participa desta etapa de validação, verificando se as respostas fornecidas pelo sistema especialista são adequadas. Mas como teoricamente todas as situações possíveis devam ser testadas para assegurar a confiabilidade do sistema, a presença do especialista não é suficiente em muitos casos, onde mesmo para um pequeno domínio de conhecimento, o número de situações torna este tipo de teste impossível.

Aconselha-se que esta etapa não seja executada pela mesma pessoa que desenvolveu o sistema e sim pelo usuário final (IEEE PES; 1993). Um outro conselho bastante útil é o de fazer os testes ao final de cada passo do projeto, não deixando-os para uma etapa final.

Os testes de validação podem ser mais abrangentes quando feitos através de um modelo analítico, ou seja, um simulador, também nem sempre disponível.

As dificuldades na validação de um sistema especialista e o tempo necessário para aceitação deste tipo de programa é que normalmente o fazem ser apresentado como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões e não um substituto para pessoas, automatizando tarefas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIDI, S. K.;DAVID, A. K.;1999.** An Object-Oriented Intelligent Approach to System Restoration. In: *Intelligent System Application to Power System (ISAP99)*. Rio de Janeiro, April 1999, p.61-65
- AOKI, A. R.;TORRES,G. L.;SOUZA, L. E.;1996.** *Planning Knowledge Acquisition For restoration of substations Using Functional Modeling*, EFEI, p.311-315.
- ALMEIDA, P. C.;STEINBERGER, J. M.;FERNANDEZ, P. C. et al.;1995.** Estudos para a validação dos procedimentos da nova filosofia de recomposição do GCOI - Detalhamento dos estudos e exemplificação para área Rio de Janeiro. In: *ENCONTRO PARA DEBATES E ASSUNTOS DA OPERAÇÃO* (5.: Dez/95: Foz do Iguaçu, Paraná).*Anais*. Foz do Iguaçu,1995. p.62-79.
- ANDRADE, H. G.;PEREIRA, L. A. C.;MARTINO, M. B. et al.;1997.** Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Auxílio a Recomposição do Sistema Elétrico de Furnas In: *SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*.(4.: Set. 1997: Rio de Janeiro ,RJ).
- CASAMATTA, F. ;STEFANO, A.;GALLANTI, M.; et al.;1999.** Serse, a Software Support Tool for the Restoration of ENEL Power System. In: *Intelligent System Application to Power System (ISAP99)*. Rio de Janeiro, April 1999, p.66-70.
- CIGRÉ TASK FORCE 38.06.03.;1993.** Practical use of Expert Systems in Planning and Operation of Power Systems. *ELECTRA*, N.146,(Feb.),p.30-67.

- CIGRE TASK FORCE 38.06.04.;1993.** A Survey of Expert Systems for Power System Restoration. *ELECTRA*, N.150,(Out.),p.87-105.
- COPEL NORMA TÉCNICA;1987.** *Operação do Sistema, Normalização após Perturbação, Recomposição do Sistema.* NTC050602.Curitiba.
- DELBEM, B. A. C.;CARVALHO, A. C. P. L. F. R. ;BRETAS, N. G.;1997.** Restabelecimento Ótimo de Energia em Sistemas de Distribuição Utilizando Algoritmos Genéticos. *In: XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-SNPTEE* (14.:Out.1997:Belém-PA).
- DILLON, T. S.; LAUGHTON, M. A. -** *Expert System Applications in Power Systems* -Prentice Hall, 1990.
- FINK, L. H.;LIOU, K.;LIU. C.;1995.** From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, V.10, N.2, (May.),p.745-751.
- FLORES, P. H.;ANDRADE, L. F. B.;TOMICICH, V. et al.;1997.** Experiência da Eletrosul na Implantação de um Centro de Telecontrole de Subestações de Transmissão *In: XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-SNPTEE* (14.:Out.1997:Belém-PA).
- GAING, Z. L.;LU, C. N.;CHANG, B. S. et al.;1996.** An Object-oriented Approach for Implementing Power System Restoration Package. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York , V.11, N.1(Feb.),p.483-489.

- GIMENES, J. A. S.;CARDOSO, M. G.;FALABELLO, M. et al.;1996.** Automação da Recomposição Local de Subestações. *In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS.*(3.: Set. 1996: Rio de Janeiro ,RJ).
- GUTIÉRREZ, J.; STAROPOLSKY, M.; GARCÍA, A.; 1987.** Policies for Restoration of a Power System. *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. PWRS-2, No. 2, May 1987, p 436-442.
- HARMON, P.; KING, D. -** *Expert Systems*, John Wiley & Sons, Inc.,1985.
- HUANG, J. A.;AUDETTE, L.;HARRISON, S.;1995.**A System Method for Power System Restoration Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, V.10,N.2, (May.),p.869-875.
- KOBAYASHI, T.;MORIDERA, D.;FUKUI, S. et al.;1993.** Verification of an Advanced Power System Restoration Support System Using Operator Training Simulator ; *IEEE Transaction on Power Systems*, New York ,V.4, N.3,(Aug.),p.248-254.
- KOJIMA, Y.;WARASHINA, S.;NAKAMURA, S. et al.;1989.** Development of a Guidance Method for Power System Restoration. *IEEE Transaction on Power Systems*, New York ,V.13, N.3, (Aug.),p.1219-1227.
- KOPIK, C. J.;1997.** Recomposição fluente do sistema Sul-FLUSS. *In: XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-SNPTEE* (14.:Out.1997:Belém-PA).

- KOSTIC, T.;ALBA, J. J.;GERMOND, A. J.;1996.** Optimization and Learning of Load Restoration Strategies. *12TH POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE* (12.:AUG.1996: Dresden) p.276-284.
- KOSTIC, T.;CHERKAOUI, R.;GERMOND, A. et al.;1998.** Decision Aid Function For Restoration of Transmission Power Systems: Conceptual Design and Real Time Considerations. *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 Generic Restoration Guidance System. In: *Intelligent System Application to Power System (ISAP99)*. Rio de Janeiro, April 1999, p.56-60.
- KUZUYAMA, N.;HAGIHARA, J.;NARA, K.;1999.** Latest Movement on Expert System Application to Power Systems –Prompt Report of Practical Applications Survey in Japanese Power Companies- In: *Intelligent System Application to Power System (ISAP99)*. Rio de Janeiro, April 1999, p.37-41.
- LEE, H. J.;LEE, C. K.;PARK, Y. M.; et al.;1999.** Intelligent Restorative Control System for Substation Automata. In: *Intelligent System Application to Power System (ISAP99)*. Rio de Janeiro, April 1999, p.321-325.
- IEEE Power Engineering Society.** *A Tutorial Course on Knowledge-Based System Techniques with Applications to Power Systems* -, 1993.
- LEFÉVRE,M.A.P.;SILVEIRA,J.R.;1997.** Blackouts-Causas e Reflexos sobre a Sociedade. In: *XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA-SNPTEE* (14.:Out.1997:Belém-PA).

- LIMA, Luiz Corrêa;1988.***Sistemas Especialistas Aplicados ao Processamento de Alarmes em Centros de Controle.* Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica)- Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MUNDIM, Marcus Vinícius ;1996.** *Desenvolvimento de uma Ferramenta Inteligente para Restabelecimento de Sistemas de Energia Elétrica.* Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica)- Universidade Federal de Minas Gerais.
- NAGASAWA, T.;HAMANO, M.;SHIMANO, S. et al.;1992.** Development of Restoration Guidance System for Control Centres. *IEEE Eletrical Power & Energy Systems*, New York, v.14,n.2/3(April-June), p. 181/188.
- ONS;1999.** *Manual de Procedimentos da Operação.* Brasília.
- RAFIAN, M.;SIGARI, P.;KIRSCHEN, D. et al.;1996.** Evaluating a Restauration Tool Using Consolidated Edison`s Training Simulator. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, V.11,N.3 (Aug.),p.1-7
- RIBEIRO, G. M. ;1993.***Sistemas Especialistas para o Restabelecimento Automático de Subestações.* Itajubá,1993.Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica)- Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- RUDNICK, H.;FRANCO, N.;HAMMONS, T. J. et al.;1998.** Latin American Deregulation Processes. *IEEE Power Engeneering Review*, New York, V.18,N.12 (Dec.),p.10-23

- SAKAGUCHI T.; MATSUMOTO K.;1983.** Development of Knowledge Based System for Power System Restoration. *IEEE Transmission on Power Apparatus and Systems*, New York , V.PAS-102, N.2 (fev), p.320-329.
- SCARAMUTTI, J. C.;1999.** *Aplicação de Algoritmos Genéticos no Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica)- Centro tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.
- SPANEL, U.;KROST, G.;1999.** System Restoration Guidance as Intelligent Application Function in Power System Control. In: *Intelligent System Application to Power System (ISAP99)*. Rio de Janeiro, April 1999, p.51-55.
- SPANNER, M.;WELFONDER, E.;FRANKE, W.;1996.**Control Behaviour of Part Power Systems During Restoration After Blackouts. *12TH POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE*, (12.:AUG.1996: Dresden) p.285-291.
- STOTT, B.; ALSAC, O.; MONTICELLI, J. A.;1987.** Security Analysis and Optimization. *Proceedings of the IEEE*, New York , V.75, N.12,(Dec.), p. 1623-1642.
- THOMAZ, W.; BORDINI, W. P.; HASSIN, E. S.; 1998.** Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. In: III CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA (CONLADIS) (III.: Set. 1998: São Paulo, SP). *Anais*, SP, p. 13-17.
- TSAI M. S.;1999.** Conceptual Design of Distributed Rule Based Expert System for Distribution Automation. In: INTELLIGENT SYSTEM APPLICATION TO

POWER SYSTEM (ISAP99).(April 1999:Rio de Janeiro, RJ). Proceedings. Rio de Janeiro, 1999. p.402-406.

WATERMAN, D. A. - *A Guide to Expert Systems*, Addison -Wesley, 1986.

WILLSON,J.D.;1996. System Restoration Guidelines: How to Set-Up, Conduct, and Evaluate a Drill. *IEEE Transactions on Power Systems* , New York, V.11, N.3(Aug.),p.1619-1629.

WILLSON,J.D.;1996.Power System Restoration Training Questionnaire Results. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York , V.11, N.3(Aug.),p.1630-1635