



GRUPO IX

ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)

**SISTEMA ESPECIALISTA DE AUXÍLIO À RECOMPOSIÇÃO DO
SISTEMA FURNAS**

**Marcello Baptista de Martino
Marcelo Batalha da Silva
Celia Regina Lourenço
Mônica V. F. Figueiredo**

CEPEL

**Jayme Darriba Macêdo*
Cassia Maria Souza Chaves
Ronaldo Leite A. Pitta**

FURNAS

RESUMO

Este trabalho descreve as características de um Sistema Especialista para apoiar os operadores do Centro de Operação do Sistema (CTOS.O) de FURNAS durante a recomposição do sistema, após a ocorrência de uma perturbação.

O objetivo principal do Sistema Especialista proposto é sugerir ao operador as providências cabíveis para a recomposição a partir dos dados adquiridos em tempo real pelo COS. O conhecimento representado tem como base as Instruções de Operação (IO) e a experiência da equipe do COS.

Este trabalho enfoca, principalmente, o sistema em desenvolvimento para o tronco de 500kV de FURNAS, dando continuidade ao sistema desenvolvido para o tronco de 750 kV.

PALAVRAS-CHAVE:

Recomposição - Sistemas Especialistas - Inteligência Artificial

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos Sistemas Elétricos de Potência vem exigindo o desenvolvimento de técnicas cada vez mais sofisticadas para supervisão, controle e automação. Embora atualmente o setor elétrico possua sistemas computadorizados de supervisão e controle, estes em geral somente substituem ou complementam

os sistemas convencionais. Todo o conhecimento sobre o planejamento e a operação do sistema elétrico continua sendo privilégio de alguns especialistas, isto é, de pessoas capazes de tomar decisões a partir da lógica, heurística, experiência e, até mesmo, intuição.

Com a expansão das redes de energia elétrica a operação do sistema tem se tornado mais complexa, aumentando o número de situações de emergência enfrentadas pelos operadores. Além disso, a quantidade de energia sob responsabilidade de cada operador tem aumentado a cada ano. Existe, portanto, uma necessidade de fornecer subsídios para que estes especialistas consigam lidar com situações que nunca viveram. Este problema torna-se ainda mais crítico ao considerar-se que o número de operadores experientes tem diminuído cada vez mais ao longo dos anos. Com a aposentadoria dos operadores mais experientes teme-se perder o conhecimento por eles armazenado.

Diversos problemas no sistema elétrico requerem o conhecimento de um especialista, capaz de resolvê-los bem melhor do que qualquer máquina. Esta característica torna atraente a utilização de técnicas de Inteligência Artificial em sua resolução. Nota-se um interesse cada vez maior na aplicação de Sistemas Especialistas para auxiliar os operadores na solução de problemas bastante diversificados como planejamento, operação, recomposição e diagnóstico.

Os próximos itens discutem, inicialmente, a atual filosofia de recomposição do Sistema Elétrico e o funcionamento de um Sistema Especialista. Os itens seguintes descrevem os requisitos de um Sistema Especialista para auxílio à tomada de decisão durante o processo de recomposição do sistema elétrico, e apresentam o Sistema de Auxílio à Recomposição desenvolvido para auxiliar o operador do Centro de Operação do Sistema (CTOS.O) de FURNAS.

2. FILOSOFIA DE RECOMPOSIÇÃO

Dada a necessidade de que a recomposição do sistema elétrico seja feita de forma rápida e segura, independente da dimensão e da abrangência da perturbação, foi elaborada uma filosofia geral de recomposição com a participação mais independente possível dos operadores das subestações de diferentes empresas separados por áreas prioritárias.

Visando agilizar ao máximo o restabelecimento das cargas prioritárias, sem comprometer a segurança, as ações de recomposição do sistema, após uma perturbação geral, foram divididas em duas fases distintas: *fase fluente* e *fase coordenada*. Ressalta-se que é entendido como tendo ocorrido uma perturbação geral, quando não houver tensão em todos os terminais das linhas de transmissão e, conseqüentemente, no barramento ao qual as mesmas estão conectadas.

Define-se por fase fluente a primeira fase do processo de recomposição que se iniciará com a sincronização de unidades geradoras ou recebimento de tensão por circuitos pré-determinados, a partir dos quais se sucederão a energização de transformadores e de outras linhas de transmissão, também já pré-determinados, com a finalidade de atender os centros de carga prioritários. Esta fase deverá se processar com a atuação exclusiva, preferencialmente, das subestações, cabendo aos Centro de Operação Regionais (CORs) e COS, a supervisão. Logo após a subestação se situar do ocorrido e tomar as providências relativas à fase fluente deve informar ao COR o término da mesma e a configuração atual da subestação.

Define-se por fase coordenada do processo de recomposição a fase seguinte à fluente, que deverá ser realizada necessariamente com a participação dos CORs e COS. Nesta fase se dará a energização dos demais equipamentos, a liberação de tomada de carga adicional e, quando for o caso, o fechamento de paralelo e/ou anel entre áreas que não foram interligadas durante a fase fluente.

Igualmente importante é a recomposição de sistemas elétricos nas condições em que não se caracterize a ocorrência de uma perturbação geral. Nestas condições os grupos de estudos definem as condições permitidas para energização de equipamentos que compõem o sistema por inteiro, conferindo à sua operação maior confiabilidade ou permitindo recomposição de montantes maiores de cargas.

O conhecimento relativo à recomposição do sistema, necessário para orientação dos operadores, quer seja em perturbações gerais ou não, encontra-se descrito nas Instruções de Operação (IO) de FURNAS [1].

As IO's são criadas a partir de testes em emuladores como o TNA do CEPEL ou programas de "Load Flow", análise dinâmica e outras ferramentas afins, e refinadas pela experiência dos técnicos. Estas instruções se modificam ao longo do tempo e as IO's são sempre revisadas.

Desta forma, o desenvolvimento de qualquer ferramenta auxiliar para uso dos operadores, encontrará nestas instruções a base necessária para validação da ação sugerida por tal ferramenta.

3. SISTEMAS ESPECIALISTAS

Um Sistema Especialista é um programa que tem por finalidade simular a atuação de um especialista em sua área de conhecimento, emulando o mecanismo de raciocínio humano, através da aplicação de regras simples em um conhecimento prévio.

Desenvolver um Sistema Especialista consiste em extrair de pessoas consideradas especialistas em determinada área, procedimentos, estratégias e regras para resolver determinado grupo de problemas e agregar este conhecimento em um sistema informatizado.

Um Sistema Especialista (Figura 1) é constituído basicamente de uma Base de Conhecimento; uma Máquina de Inferência e uma Interface com o Usuário.

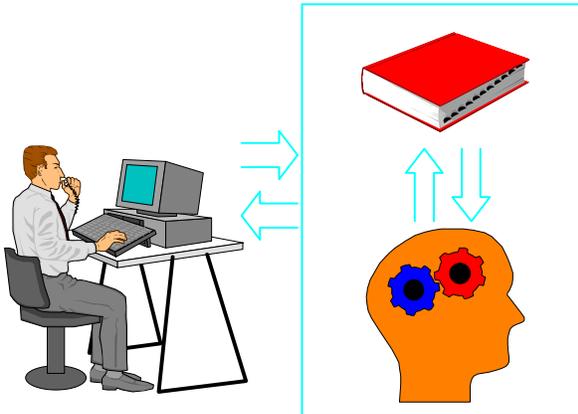


Figura 1 - Estrutura de um Sistema Especialista

O conhecimento acerca de um determinado assunto é armazenado na Base de Conhecimento, e a Máquina de Inferência se encarrega de avaliar, encadear e determinar quando e como este conhecimento deve ser utilizado.

A base de conhecimento é composta por duas partes: uma base de fatos e uma base de regras. Na base de fatos representa-se o conhecimento que o sistema possui do problema a ser resolvido. Na base de regras representa-se o conhecimento que o especialista possui sobre o problema.

A base de regras é composta por regras com a forma:

SE condição **ENTÃO** ação

Por exemplo, **SE** (a tensão na linha for zero)

ENTÃO (abra o disjuntor)

A máquina de inferência faz com que a base de regras atue sobre a base de fatos, inferindo novos fatos para tentar achar uma solução para o problema.

A interface com o usuário deve permitir o acesso à base de fatos, bem como o controle da máquina de inferência.

4. SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À RECOMPOSIÇÃO

Um sistema especialista para auxílio a recomposição de sistemas elétricos de potência tem por objetivo apoiar o operador na normalização das operações de uma ou mais subestações após desligamentos totais ou parciais, reintegrando-as ao sistema, diminuindo o tempo total de paralisação do fornecimento de energia aos consumidores, de forma eficiente e segura [2]. Os procedimentos de recomposição devem levar o Sistema Elétrico de Potência para um estado seguro onde todas as cargas estejam sendo alimentadas.

A necessidade de rapidez e segurança no processo de recomposição tem motivado a utilização de técnicas de Inteligência Artificial (principalmente, Sistemas Especialistas) como uma ferramenta auxiliar para o

operador. De um modo geral, estes Sistemas Especialistas devem ter as seguintes características :

- Reconhecer rapidamente um estado de perturbação
- Definir o estado final do processo restaurativo
- Formular um conjunto de ações para levar o sistema ao estado desejado
- Armazenar o conhecimento de medidas operacionais disponíveis para efetuar a recomposição
- Oferecer uma interface amigável para os operadores
- Ter compromisso entre velocidade da resposta e adaptabilidade para diversas topologias
- Utilizar ferramentas especiais para manutenção da base de conhecimento
- Operar a partir dos dados em tempo real

Basicamente, as ações tomadas por um sistema especialista na recomposição envolvem a reconexão do parque gerador do sistema de transmissão e de cargas, onde o seqüenciamento do conjunto de ações possíveis é determinado por um conjunto de critérios, como o balanço de potência ativa entre geração e carga, disponibilidade de geração, prioridades de certas cargas e conexões e limitação nos valores de tensão e corrente do sistema de transmissão [3 a 6].

O Sistema Especialista deve sugerir ao operador as providências cabíveis para a recomposição do Sistema Elétrico de Potência, devendo para tal ser capaz de identificar quais componentes podem ser reenergizados e procurar identificar qual o melhor procedimento de recomposição [7].

As opções que serão propostas a cada solicitação de recomposição pelo sistema especialista obedecem rigorosamente às Instruções de Operação (IO), procedimentos escritos e revistos, baseados em diversos estudos prévios realizados.

5. SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE 500kV DE FURNAS

O Sistema para Auxílio à Recomposição do Sistema de 500kV de FURNAS foi desenvolvido baseado em um shell de Sistemas Especialistas [8]. Assim, foi criada uma Base de Fatos que descreve a topologia do sistema e seu estado atual, e uma Base de Regras que representa o conhecimento embutido nas IO e analisado pelos operadores de FURNAS.

5.1 Descrição do Sistema de 500kV de FURNAS

O sistema de transmissão de 500kV é formado por 10 (dez) subestações :

Araraquara (STAR); Adrianópolis (STAD); Campinas (STCA); Poços de Caldas (STPC); Grajaú (STGR); Cachoeira Paulista (STCH); Tijuco Preto (STTP); São José (STSJ); Marimbondo (USMR) e a ngra (USAN)

O Sistema de Transmissão de 500 kV se encontra na região sudeste, aonde se concentram os maiores centros urbanos e industriais do país. Em linhas gerais, o tronco de 500 kV é, sem dúvida, um dos troncos de vital importância para o Sistema Interligado.

5.2 Base de Fatos

A estrutura de dados utilizada (Figura 2) baseia-se no conceito de objetos. As instâncias de cada classe correspondem aos diversos elementos do sistema elétrico de potência, e contêm atributos (slots) e métodos específicos que armazenam todas as informações relativas àquele elemento do sistema elétrico, tais como valor de tensão, estado, condições para energização, etc...



Figura 2 - Estrutura básica de classes

5.3 Base de Regras

Após uma detalhada análise das Instruções de Operação foi elaborado um conjunto de regras com o objetivo de permitir que o mecanismo de inferência, quando disparado, gere para o operador as ações possíveis de serem executadas a partir do estado atual, indicado pelos componentes do sistema. Estas regras variam de acordo com o sistema a ser recomposto.

Para permitir a atualização das regras pelo próprios responsáveis pela atualização das IO's foi criada uma ferramenta especial para manutenção da Base de Regras, denominada "Editor de Regras".

5.4 Ferramenta para Atualização das Regras

O objetivo do "Editor de Regras" é permitir ao usuário descrever as regras de energização de cada um dos equipamentos do sistema elétrico.

De acordo com as instruções de operação de cada uma das subestações do tronco de 500kV de FURNAS (IO), algumas regras devem ser obedecidas para a energização de cada uma das linhas de transmissão. As regras descritas nas IO são passíveis de alteração conforme o sistema adquira novas características.

Para que o sistema de auxílio à recomposição possa receber as eventuais alterações das condições contidas nas IO, foi desenvolvido um sistema para edição destas regras, de forma que o próprio operador do sistema possa não somente efetuar estas alterações, como também ser o responsável pela manutenção das regras de energização do sistema. Estas regras são então armazenadas e poderão assim ser utilizadas durante a execução do sistema de auxílio à recomposição.

De forma geral, as regras são constituídas de condições ligadas por estruturas de conexão: "E", "Ou", "Uma das opções Abaixo Precisa Estar Satisfeita:", "Fim das Opções" (Quadro 1).

```

'A tensao máxima precisa ser 500 kV' .E.
Uma das opções abaixo precisa estar satisfeita :
'Marimbondo - pelo menos 3 unidades geradoras
devem estar sincronizadas'
.OU.
Uma das opções abaixo precisa estar satisfeita :
'LT Marimbondo-Araraquara (linha 1) presente'
.OU.
'LT Marimbondo-Araraquara (linha 2) presente'
Fim das Opções .E.
Uma das opções abaixo precisa estar satisfeita :
'O reator da linha 1 Araraquara - Marimbondo
precisa estar ligado'
.OU.
'O reator da linha 2 Araraquara - Marimbondo
precisa estar ligado'
Fim das Opções
Fim das Opções
  
```

Quadro 1 - Estrutura de uma Regra

O Editor de Regras (Figura 3) possui uma tela com a descrição da regra completa à esquerda, a lista de condições (à direita), e botões para inserção dos conectivos. O editor se encarrega de verificar a sintaxe.

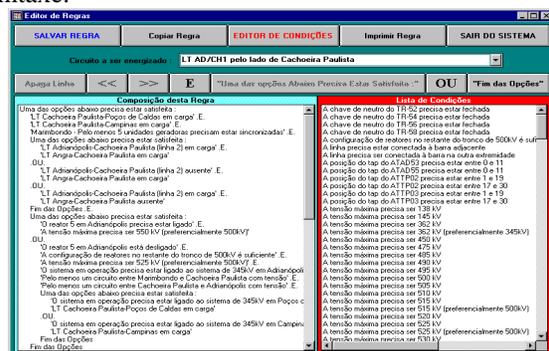


Figura 3 - Editor de Regras

É possível acrescentar novas condições à lista através do Editor de Condições (Figura 4). A edição de uma condição consiste em selecionar um equipamento existente na Base de Fatos e associar a ele um valor desejado. O texto da condição apresentada no Editor de Regras deve ser editada no campo descrição.

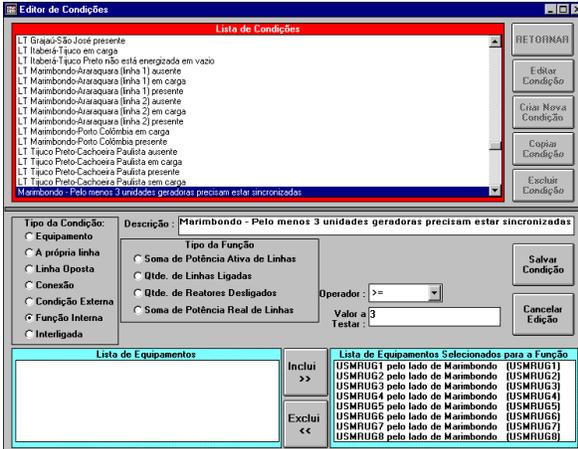


Figura 4 - Editor de Condições

5.5 Interface com o Usuário

A Interface Homem-Máquina possui uma tela geral do tronco de 500kV e um conjunto de telas para cada uma das subestações, permitindo ao operador visualizar com diferentes níveis de detalhes as condições dos diversos componentes das subestações, tais como: valores de tensão nas linhas, estado dos disjuntores, atendimento ou não das condições externas do sistema elétrico de FURNAS, quantidade de geradores, reatores e tap de transformadores, etc. Qualquer tela pode ser acessada a partir de botões que, ao serem pressionados, abrem a tela correspondente.

A tela geral do tronco de 500kV (Figura 5) apresenta um esquema elétrico que une os elementos fundamentais das subestações para permitir uma visão global do sistema elétrico, tais como disjuntores e indicadores de tensão.

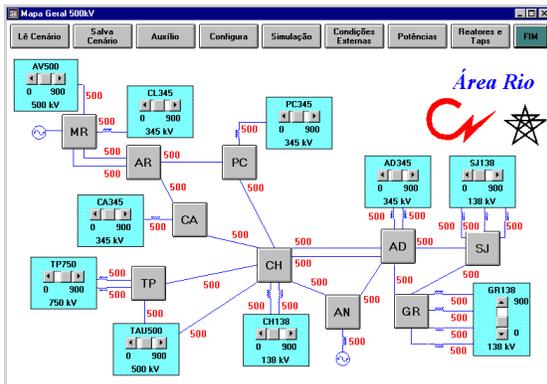


Figura 5 - Tela geral do sistema 500 kV

Caso o operador deseje uma visão mais detalhada do sistema elétrico ele pode solicitar a apresentação da tela de uma determinada subestação através dos botões correspondentes.

Nas telas das subestações (figura 6), cada disjuntor, capacitor ou reator é representado por um indicador do tipo “check-box”. Níveis de tensão são representados por “sliders” ou “meters”. Um conjunto de botões no lado direito das telas possibilita a visualização de telas de outras subestações.

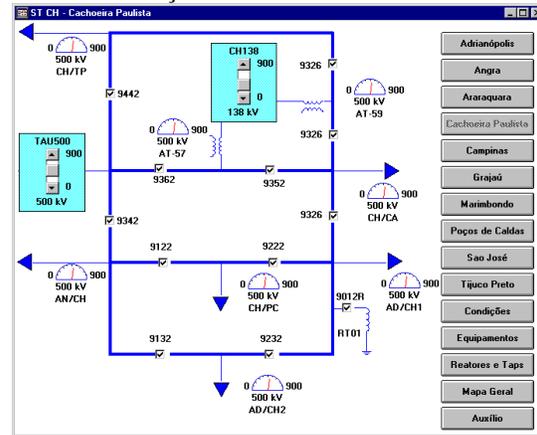


Figura 6 - Tela de subestação

Em caso de perturbações no sistema existe uma tela que apresenta a situação atual de cada subestação do tronco de 500kV (Figura 7) para auxiliar o especialista a recompor o sistema.

Subestação	Situação
Araraquara	Subestacao normalizada
Adianópolis	Subestacao normalizada
Campinas	Subestacao normalizada
Pocos Caldas	Subestacao normalizada
Grajaú	Subestacao normalizada
Cachoeira Paulista	Subestacao normalizada
Tijuco Preto	Subestacao normalizada
Sao Jose	Subestacao normalizada
Marimbondo	Subestacao normalizada
Angra	Subestacao normalizada

Figura 7 - Tela geral de auxílio à recomposição

O operador pode analisar mais detalhadamente a situação de cada uma das subestações do sistema, através de um duplo-clique em seu nome, abrindo uma tela específica de auxílio (Figura 8).

Esta tela possui um quadro “Comandos Possíveis”, que apresenta ao operador todos os comandos que podem ser executados para efetuar a recomposição do sistema elétrico. Um outro quadro, “Energizações Não Satisfeitas”, apresenta ao operador as energizações que poderiam ser executadas caso seus pré-requisitos estivessem satisfeitos. Caso o operador selecione uma destas energizações não satisfeitas, o quadro “Condições para Energização” mostrará uma lista com as pré-condições a serem atendidas de modo a

tornar a energização selecionada possível. Neste quadro, estão destacadas as condições que não estão satisfeitas, no caso em questão, que impedem a energização do equipamento.

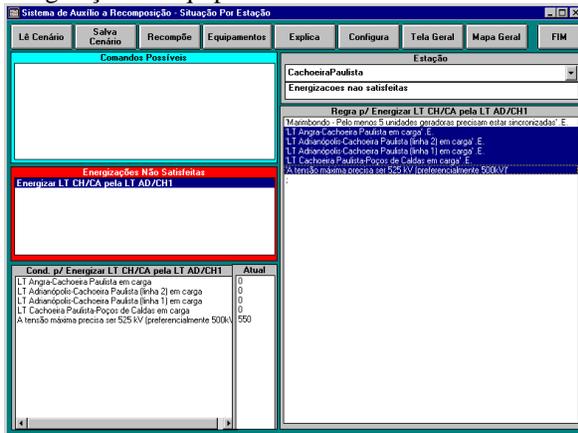


Figura 8 - Tela específica de auxílio à recomposição

5.6 Ligação em Tempo Real

O Sistema de Recomposição do 500 kV está sendo ligado ao Sistema de Supervisão e Controle (SSC) para acesso aos dados de tempo real adquiridos pelo COS. O SSC do COS de FURNAS é constituído por computadores VAX 11/785 da DEC (Digital Equipments Corporation), ligados em rede padrão ETHERNET, através do software DECNET. Tal passo foi efetuado no Sistema de Recomposição do Tronco de 750 kV.

6. CONCLUSÕES

O sistema especialista para apoio à recomposição do sistema elétrico de 500 kV de FURNAS encontra-se em fase final de desenvolvimento. Inicialmente, ele será utilizado no treinamento dos operadores do COS de FURNAS.

A divisão do Sistema FURNAS em subsistemas (tronco de 750 kV, tronco de 500 kV e demais troncos) permitiu a obtenção mais rápida de protótipos. A utilização dos protótipos permite uma crítica antecipada evitando custos de desenvolvimento desnecessários.

A utilização de um shell de Sistemas Especialistas com orientação a objetos, simplificou a tarefa de criar a Base de Fatos e a Base de Regras.

A criação do Editor de Regras para manutenção das regras do sistema especialista permitirá a utilização prática do sistema no dia a dia do COS.

Finalmente, durante os testes, verificou-se que o tempo que o sistema especialista leva para analisar a situação e sugerir um procedimento para o usuário foi totalmente satisfatório, viabilizando sua utilização pelos operadores.

Como futuras atividades previstas para o desenvolvimento do sistema especialista pretende-se expandir a base de conhecimento para o restante do sistema elétrico de FURNAS.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] Instruções de Operação de FURNAS - IO FI-201, IV-201, IA-201, TP-201, MR-201, AR-201, CA-201, PC-201, CH-201, AD-201, GR-201, SJ-201, AN-201, IG 101 e IG 202.

[2] Pitta R. L. A. - "Sistemas Especialistas Aplicados a Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência" - Tese M.Sc., COPPE-UFRJ, abril de 1991.

[3] Ribeiro G. M. - "Sistemas Especialistas para o Restabelecimento de Subestações" - Tese M.Sc., EFEI, maio de 1993

[4] Sakagushi, T.; Matsumoto, K.; - "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102 No.2, pp 320-329, Fevereiro 1983

[5] Adibi, M. M., Borkoski, J. N., Kafka, R. J. - "Expert Systems Requirements for Power System Restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9 No.3, pp 1592-1600, Agosto 1994

[6] Lameiras M.S., Masci H.M., Ribeiro G.M., Pena, H.S. - "Restabelecimento Sistêmico Inteligente - Desenvolvimento de um Sistema de Apoio ao Despachante", SIMPASE, Setembro 1994

[7] Andrade, Homero G. et al - "Desenvolvimento de Um Sistema Especialista Para Auxílio à Recomposição do Sistema Elétrico de Furnas"- III SIMPASE, Setembro 1996

[8] Martino, Marcello de et al - "Um Sistema Especialista Para Auxílio à Recomposição do Tronco de 750kV de Furnas"- VII ERLAC, Julho 1997