

# Sistema Especialista para Apoio a Recomposição do Sistema CTEEP

C. R. Guirelli, J. A. Jardini, L. C. Magrini, *USP*  
S. U. Cabral, B. N. Dias, *CTEEP*

**Resumo** - Este trabalho apresenta o resultado de um projeto de pesquisa conjunto da USP com a CTEEP Transmissão Paulista para o desenvolvimento de um sistema computacional de apoio a recomposição do sistema de transmissão da CTEEP, baseado em inteligência artificial. O sistema foi denominado SEAR – Sistema Especialista de Apoio a Recomposição. O SEAR se utiliza de um sistema especialista programado com as regras de operação do ONS, sendo capaz de identificar situações de blecaute e fornecer os procedimentos necessários a recomposição em forma de texto e gráfica, através nos unifilares do sistema elétrico.

**Palavras-chave**— sistemas especialistas, recomposição, sistemas de potências, sistemas de transmissão, inteligência artificial

## I. INTRODUÇÃO

Durante a recomposição do sistema elétrico do estado de São Paulo após um *blackout*, deve-se atender uma grande quantidade de cargas concentradas na região da cidade de São Paulo, a partir de usinas situadas no outro extremo do estado.

O processo de recomposição atualmente utilizado procura religar as principais linhas de transmissão e alocar parte da carga formando ilhas estáveis no sistema, é o chamado processo fluente de recomposição. Após o processo de recomposição fluente, as ilhas do sistema são interligadas e o restante da carga alocada, constituindo o processo coordenado de recomposição.

A fim de executar a recomposição do sistema, os operadores devem seguir os procedimentos de recomposição fluente e coordenada homologados pela ONS.

Há no entanto uma forte pressão para a rápida recomposição do sistema, uma grande quantidade de informações e alarmes sendo gerados pelo SSC e uma grande quantidade de procedimentos a serem seguidos. Tem-se ainda o problema

que muitas vezes o sistema elétrico apresenta condições durante a recomposição que não estão previstas nos procedimentos, dificultando a recomposição.

A fim de auxiliar os operadores durante o processo de recomposição, foi proposto um projeto de pesquisa conjunta entre a USP e a CTEEP, visando o desenvolvimento de um sistema capaz de auxiliar os operadores durante o processo de recomposição, que seguisse exatamente os procedimentos aprovados pelo ONS.

## II. O SOFTWARE

### A. Introdução

O sistema desenvolvido foi denominado SEAR – Sistema Especialista para Apoio a Recomposição, e é composto de 3 módulos que executam as seguintes funções :

- Coleta de medições e indicações de estados do sistema elétrico;
- Visualização gráfica, em diagramas unifilares, do estado do sistema elétrico;
- Processamento um sistema especialista (SE) capaz de identificar *blackouts* e sugerir manobras.

O sistema funciona com uma estrutura cliente/servidor, havendo um computador servidor responsável pelo fornecimento dos dados do sistema elétrico e diagramas unifilares e três computadores clientes instalados nas mesas dos operadores, com processamento local de sistema especialista.

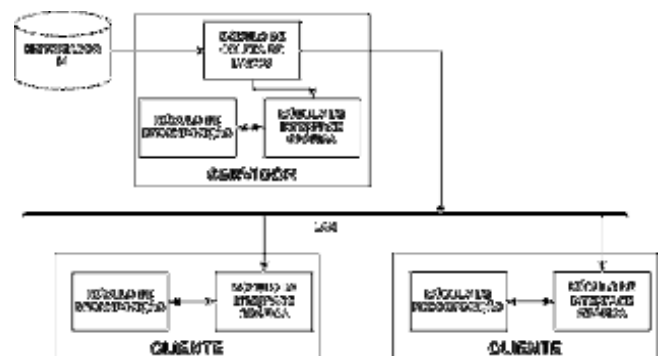


Fig 1 - Estrutura do SEAR

S. U. Cabral (Gerente do Projeto) trabalha na CTEEP – Transmissão Paulista (scabral@ctEEP.com.br).

B. N. Dias (pesquisador) trabalha na CTEEP – Transmissão Paulista (bdias@ctEEP.com.br).

J. A. Jardini (Coordenador do projeto), Prof. Dr. Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/ Departamento de Engenharia de Energia e Automação Eléctricas da USP/ GAGTD (jardini@pea.usp.br).

L. C. Magrini (Pesquisador), PhD e trabalha no EPUSP/ PEA/ GAGTD – Grupo de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia (magrini@pea.usp.br).

C. R. Guirelli (Pesquisador), MSc e trabalha no EPUSP/ PEA/ GAGTD – Grupo de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia (cguirelli@pea.usp.br).

### B. Módulo de Coleta de dados

O SEAR periodicamente coleta a topologia da rede e medições na base de dados histórica do sistema EMS. A aquisição de dados é como uma foto (*snapshot*) do sistema elétrico em um dado instante.

O sistema EMS varre uma vez a cada quatro segundos suas Unidades Terminais Remotas e salva os dados aquisitados no historiador PI. O SEAR irá coletar do PI as informações que necessita para a recomposição da rede elétrica.

Entre as informações obtidas temos :

- Indicações de estado de disjuntores e seccionadoras;
- Fluxo de potência ativa em linhas, trafos e máquinas;
- Tensão em barras e máquinas.

Cada grandeza vem acompanhada de um parâmetro de qualidade indicando a validade do dado.

O sistema SEAR não é capaz de processar as informações e o sistema especialista a cada varredura do EMS mas como o processo de recomposição ocorre de maneira mais lenta, a aquisição de dados a cada 30 segundos mostrou-se adequada ao sistema.

### C. Módulo de Interface Gráfica

A topologia e medições do sistema elétrico são visualizados graficamente por meio de diagramas unifilares. Foram utilizados unifilares para cada um dos principais corredores de recomposição (Fig 2, Fig 3) :

- Água vermelha
- Capivara/Taquaruçu
- Chavantes
- Ilha Solteira
- Jupiaá



Fig 2 - Visualização parcial do unifilar do corredor Jupiaá



Fig 3 - Unifilar do sistema 440kV de São Paulo

A interface gráfica proporciona uma série de funcionalidades :

- Interface semelhante a outros softwares para sistema operacional *Windows*;
- Codificação de cores idêntica ao adotado pelo sistema EMS;
- Medições disponíveis ao toque de cursor (Fig 4);
- Texto das regras ONS disponíveis ao toque de cursor (Fig 5);
- Indicação gráfica das ações necessárias à recomposição;
- Desenvolvida para atender as necessidades dos operadores.



Fig 4 - Regras e dados ligados a um equipamento



Fig 5 - Regras ONS disponíveis na interface gráfica

A interface gráfica dispõe ainda de uma opção de simulação que permite a criação de cenários para testes do sistema especialista e treinamento dos operadores.

O sistema dispõe também de uma base de dados em *Microsoft Access* que armazena eventos de recomposição passados, permitindo o estudo de recomposições executadas anteriormente.

#### D. Módulo de Recomposição

O módulo de recomposição recebe as informações da topologia e medições do sistema elétrico e em conjunto com a base de regras desenvolvida, processa o sistema especialista (Fig 6).



Fig 6 - Módulo do sistema especialista

O sistema especialista processa as regras do ONS para os corredores e fornece o conjunto de operações necessárias para permitir a recomposição. Por exemplo :

Recomposição Fluente da área Jupirá / UHE Jupirá / Sincronizar 6 unidades geradoras.

As operações necessárias são visualizadas tanto no módulo de interface gráfica quanto em forma de texto e com indicação gráfica, na forma de elipse ao redor do símbolo do equipamento caso ele apresente alguma não conformidade nos procedimentos registrados na base de regras (Fig 7).

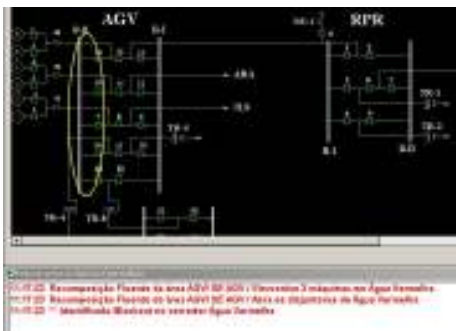


Fig 7 - Saídas do sistema especialista

### III. SISTEMA ESPECIALISTA

Grande parte do sistema SEAR foi desenvolvido em *Microsoft Visual Basic*. Já o sistema especialista, que é parte do módulo de recomposição, foi modelado em *CLIPS*, que é

uma linguagem desenvolvida especificamente para a criação de sistemas especialistas baseados em regras. É um *software* desenvolvido originalmente em 1985 pela NASA, amplamente utilizado e compatível com inúmeros softwares comerciais.

Foi desenvolvida uma máquina de inferência e uma estrutura de dados visando uma forma genérica de definir as regras de recomposição, permitindo assim a fácil alteração e manutenção do sistema.

O sistema especialista possui um *snapshot* do sistema elétrico atualizada periodicamente com dados do historiador e uma base de dados de regras de recomposição, baseadas na documentação do ONS. A máquina de inferência processa as regras com as informações coletadas e fornece as informações para recomposição ao módulo de interface gráfica (Fig 8).

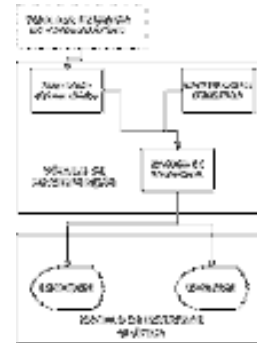


Fig 8 - Estrutura do módulo de recomposição

#### A. Base de dados do sistema elétrico

As informações do sistema elétrico são armazenadas como listas de dados no sistema especialista com o formato :

( elemento (tipo xxx) (target xxx) (status xxx)  
(tag xxx) (maquinas xx) (maquinas\_sinc xx)  
(tensao xx) (fluxo xx)

Onde :

- *tipo* - tipo de equipamento : disjuntor, barra, etc.
- *target* - identificação do equipamento. Ex. Disj\_1\_JUP
- *status* - situação do equipamento : operando, impedido, aberto, fechado, etc;
- *tag* - nos disjuntores indica se apresentam impedimento operativo;
- *máquinas* - número de máquinas ligadas ao equipamento. Só para barras;
- *máquinas\_sinc* - número de máquinas sincronizadas ligadas ao equipamento. Só para barras.;
- *tensão* - tensão de operação do equipamento
- *fluxo* - medição do fluxo de potência ativa no equipamento;

Se a grandeza não se aplica ao equipamento em questão, é preenchida com zero.

```

elemento      tipo BARRA
Largal ACV_550_BII
status 0
tag 0
Maquina005 0
Maquina006 0
tensao 0 (110kV)

elemento      tipo DISJUNTOR
Largal ACV_DIS_19
status 0
tag 0
Maquina005 0
Maquina006 0
tensao 0
luxo 0

elemento      tipo LIMHA
Largal LIM_ACV_IIS
status 0
tag 0
Maquina005 0
Maquina006 0
tensao 0
luxo 0
    
```

Fig 9 – Exemplo de Barra, Linha e Disjuntor na base de dados do sistema especialista

A base de informações do sistema elétrico possui 974 equipamentos cadastrados.

Sua criação e manutenção é feita automaticamente.

**B. Base de Regras**

Os procedimentos de recomposição do ONS precisaram ser convertidos em um formato adequado ao sistema especialista.

Os procedimento estão no formato vista na Tabela 1.

Tabela 1- Alguns procedimentos de recomposição ONS

PROCEDIMENTO	OBJETIVO / ITEM DE CONTROLE
Energizar a LT 440 kV Jupia / Três Irmãos, a partir da SE Jupia, enviando tensão para a UHE Três Irmãos .	•Usina Jupia com 8 UGs sincronizadas e geração ≥ 300 MW .

Assim como nos procedimentos, o sistema especialista deve verificar uma série de itens de controle e sugerir ações que coloquem o sistema elétrico em conformidade com o procedimento.

Para a criação da base de regras, cada procedimento e item de controle foram transformados em conjuntos de regras binárias, ou seja, a solução pode ser verdadeira ou falsa.

A combinação dessas regras dá origem a uma série de grafos binários. Um detalhe desses grafos pode ser vista na Fig 10.

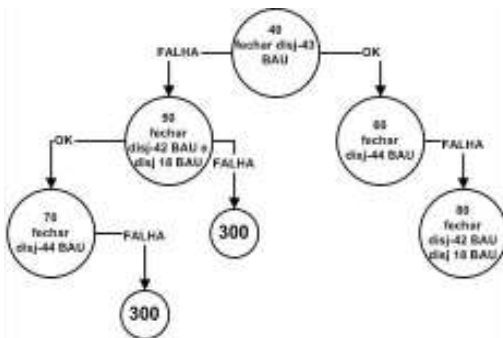


Fig 10 - Árvore binária de regras de recomposição

Ao ser executada, a máquina de inferência percorre o grafo analisando as regras. Após a análise de cada regra temos duas possibilidade : a regra foi atendida ou a regra não pôde ser atendida.

Cada resposta leva a um novo ramo do grafo. O processo prossegue até que se chegue ao final da recomposição ou se chegue a uma situação sem saída, ou seja, uma condição do sistema elétrico para o qual não há regra programada com uma solução.

Isso ocorre pois, o sistema de regras implementa atualmente uma versão dos procedimentos ONS que não contempla todas as contingências do sistema elétrico.

A estrutura da base de regras permite no entanto que novas regras sejam incluídas de modo a poder evoluir e um maior número possível de contingências esteja coberto pelo sistema.

A base de regras desenvolvida possui atualmente 845 condições. Um exemplo da sintaxe das regras pode ser visto na Fig 11.

```

(regra (numero_regra JUP_40)
(proxima_regra JUP_60)
(regra_opcional JUP_50)
(corredor JUPIA)
(disjuntor_AND BAU_DIS_43)
(status 1)
(info "Recomposição Fluente da área Jupia/
UHE Jupia / Fechando circuito JUP-BAU
C1. Inserir o reator RE-1 em Bauru.")
(info2 "")
(info3 "** Não é possível inserir o reator RE-1
BAU. Recomposição por C1 continuará com
Re-4 e RE-6 de Bauru"))
    
```

Fig 11 - Regras de recomposição

**C. Máquina de Inferência**

A máquina de inferência resultou em 16 funções e 42 variáveis para permitir o processamento da base de regras, bases de dados e troca de informações entre os módulos do programa.

Ao ser processada, a máquina de inferência chega a executar até 13000 iterações em uma única etapa da recomposição.

**IV. DESENVOLVIMENTO E TESTES DO SISTEMA**

A interface gráfica do sistema foi desenvolvida e testada com o auxílio dos operadores da empresa a fim de determinar as necessidades reais dos usuários finais e chegar a uma interface o mais amigável possível.

Os testes do processo de recomposição apenas puderam ser efetuados através do modo de simulação. Com os testes foi possível a verificação e ajuste da base de regras a fim de que esteja exatamente como os procedimentos.

O processo completo de leitura de dados, visualização e processamento do sistema especialista leva de 20 a 30 segundos, de acordo com a etapa da recomposição, sendo adequada as necessidades dos operadores.

## V. CONCLUSÃO

O sistema especialista para apoio a recomposição se apresenta como uma ferramenta capaz de permitir uma rápida visualização dos unifilares e dos passos necessários a recomposição, em forma de texto e gráfica nos unifilares, filtrando os alarmes do sistema se supervisão.

Por seguir fielmente as regras estabelecidas pelo ONS, o processo executado pelo sistema pode ser auditado.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Martino, M. B. de *et al.*, "Sistema especialista de auxílio à recomposição do sistema Furnas", XV SNPTTE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 17-22 Out. 1999.
- [2] Islam, S. ; Chowdhury, N., "A case-based Windows graphic package for the education and training of power system restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 16 , Issue: 2 , May 2001.
- [3] Lambert-Torres, G. ; Borges da Silva, L.E. ; Moutinho Ribeiro, G. ; Povia, M. J., "An intelligent tool for power system restoration: an example using CESP transmission system", PowerCon 2000 - International Conference on Power System Technology, Volume: 2 , 4-7 Dec. 2000.
- [4] Young-Moon Park; Kwang-Ho Lee," Application of expert system to power system restoration in sub-control center", IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 12 , Issue: 2 , May 1997.
- [5] Kadar, P. ; Mergl, A. K,"CORES-the continuous restoration expert system", ISAP '96 - International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, 28 Jan. 2 Feb. 1996.
- [6] Adibi, M. M. ; Kafka, L. R. J. ; Milanicz, D. P., "Expert system requirements for power system restoration", IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 9, Issue: 3 , Aug. 1994.
- [7] Brunner, T. ; Nejd, W. ; Schwarzjirg, H. ; Sturm, M., "On-line expert system for power system diagnosis and restoration", Intelligent Systems Engineering , Volume: 2 , Issue: 1 , spring 1993.
- [8] Ebert, A. ; Eppel, M. ; Genthe, S. ; Schwarzjirg, H. ; Stark, J. ; Werner, W , "System restoration of a transmission network", Proceedings of EMPD '95 - International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1995, Volume: 1, 21-23 Nov. 1995.

## VII. BIOGRAFIAS



**José Antonio Jardini**, nasceu em 27 de março de 1941, formado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP (EPUSP) em 1963. Mestre em 1970, Doutor em 1973, Livre Docente/ Prof Associado em 1991 e Professor Titular em 1999 todos pela EPUSP Departamento de engenharia de Energia e Automação Elétricas (PEA). Trabalhou de 1964 a 91 na Themag Eng. Ltda atuando na área de estudos de sistemas de potência, projetos de linhas e automação.

Atualmente é professor da escola Politécnica da USP do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas onde leciona disciplinas de Automação da Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Foi representante do Brasil no SC38 da CIGRE, é membro da CIGRE, Fellow Member do IEEE, e Distinguished Lecturer do IAS/IEEE.



**Luiz Carlos Magrini** nascido em São Paulo, Brasil, 3 de maio de 1954. Graduado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1977 (Engenharia Elétrica). Recebeu pela mesma instituição o título de MSc e PhD em 1995 e 1999,

respectivamente. Trabalhou por 17 anos na Empresa Themag Engenharia Ltda. Atualmente, além de Professor de Universidades faz parte, como pesquisador/ coordenador de Projetos, do Grupo GAGTD na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



**Cleber Roberto Guirelli**, nasceu em Santo André, SP, Brasil, em 26 de julho de 1970. Graduado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Energia e Automação Elétricas, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1993. Recebeu pela mesma instituição o grau de mestre em 1999. Atualmente realiza o curso de doutorado. Atuou 3 anos na área de ensaios de alta tensão no IEE-USP, 6 anos na área de automação industrial e atualmente trabalha como pesquisador pelo grupo GAGTD na

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e como professor em outras Universidades.



**Sérgio Roberto Urioste Cabral**, em Santos-SP, formado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de Lins em 1975. Engenheiro de Manutenção de LT's da LIGHT em 1976 e Professor na Escola de Engenharia de Lins no mesmo ano. Ingressou na CESP - Cia. Energética de São Paulo em 1977, como Engenheiro de Manutenção de Subestações até 1981. Gerente da Divisão de Operação do Tietê e do Centro Regional de Operação de Bauru até 1998. Desde 1999 é Gerente do Centro de

Operação do Sistema de Transmissão do Estado de São Paulo, pela CTEEP.



**BENEDITO NILSO DIAS** - nascido em Itajubá, MG, Brasil. Graduado em Engenharia Elétrica, pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, em Itajubá MG, em 1977. Curso de Pós-graduação em operação de sistema elétrico de potência em Despacho e Subdespacho, pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG ,em 1985. Curso de Pós-graduação em Engenharia da Qualidade pela FAAP, em 1996. Iniciou sua carreira profissional no

Centro de Operação do Sistema - COS da CESP em 1978, onde exerce suas atividades até a data de hoje, como supervisor da Área de Normas da Operação da CTEEP.