



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Sistema Inteligente de Apoio ao Diagnóstico e Restauração da CELESC

**J.G. Rolim * H.H. Zürn * R.A. Silva * A.F. Zeitune * C.A. Teixeira * L.H.C. de Verney *
C. V. Nascimento ** J. M. Ribeiro ****

*** Grupo de Sistemas de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil**

(email jackie, hans, ronaldo, anésio, cassiano, lheverney@labspot.ufsc.br)

**** Centrais Elétricas de Santa Catarina - Celesc**

(email claudiovn, joaor@celesc.com.br)

Resumo

Este artigo descreve o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio aos operadores de redes de sub-transmissão e distribuição de energia elétrica na tomada de decisões durante ocorrências com desligamentos definitivos. Durante estas ocorrências, o operador deve interpretar as mensagens de alarmes recebidas, extrair uma conclusão a partir dos dados disponíveis sobre a origem dos desligamentos, decidir se algum equipamento deve permanecer fora de operação até inspeção por equipes de manutenção e, em seguida, efetuar a seqüência de manobras para restabelecimento da condição de operação normal. O sistema desenvolvido com estes objetivos utiliza a técnica de sistemas especialistas e possui quatro módulos principais: um configurador de rede, um sistema de diagnóstico, um sistema de apoio à recomposição e uma interface com o usuário e com o banco de dados do sistema de supervisão. Estes módulos, assim como a aplicação do protótipo deste sistema à uma rede real de 138/69 kV serão descritos ao longo do texto.

Palavras-chave

Diagnóstico de faltas, recomposição, sistemas especialistas.

1. Introdução

Atualmente, a operação em tempo real de subestações é feita utilizando-se recursos da tecnologia digital, que substituiu a operação convencional que era feita através de painéis, mesas de operação com botoeiras, chaves seletoras, etc.. Os modernos sistemas de supervisão e controle são compostos por *hardware* e *software* que processam os dados recebidos das unidades através de uma rede de comunicação, transformando-os em informações que podem ser entendidas pelos operadores. Dentre estas informações destacam-se as grandezas analógicas e informações sobre status de equipamentos de manobra, geralmente apresentadas através de telas que representam os unifilares de subestações, alarmes e seqüências de eventos registrados com precisão de milissegundos. Também é possível o comando remoto de equipamentos, tais como disjuntores, chaves seccionadoras e tap de transformadores.

Embora na maior parte do tempo os operadores desempenhem tarefas corriqueiras, como ajuste de posição de tap de transformadores para controle de tensão, durante a ocorrência de desligamentos imprevistos é deles a responsabilidade pelo restabelecimento do fornecimento no menor espaço de

tempo possível, minimizando prejuízos causados pelas interrupções tanto para consumidores quanto para a empresa de distribuição de energia elétrica. Com a expansão das redes elétricas, a carga sob responsabilidade de cada operador tem aumentado, assim como a complexidade da operação do sistema, ao mesmo tempo em que tem-se observado uma tendência de diminuição do tempo médio de experiência dos operadores em serviço.

Sabe-se que qualquer sistema de potência está sujeito a distúrbios. Quando um sistema é bem projetado, e possui proteções ajustadas com manutenção adequada, os distúrbios podem ser isolados, evitando desligamentos em cascata; porém, quando um segmento importante do sistema é desligado, pode ocorrer a uma condição incontrolável de tensão e frequência provocando blecaute no sistema.

Todos estes fatores, aliados à exigência cada vez maior de qualidade e continuidade no fornecimento, tornam essencial o desenvolvimento de ferramentas de suporte que auxiliem o operador no processo de tomada de decisão após contingências, tanto na etapa de diagnóstico da ocorrência quanto na de restauração do sistema à situação normal.

A base de conhecimento do sistema especialista desenvolvido foi implementada após uma etapa de entrevistas com especialistas na filosofia de proteção da empresa, operadores e estudo das principais instruções de operação. A aplicação deste sistema visa apoiar o operador em situações onde o excesso de informações e o stress poderiam levar a erros, minimizando a duração das interrupções.

2. Características do Sistema

A Figura 1 ilustra uma visão geral do sistema. A *Base de Dados do Sistema*, é conectada através de uma Rede Ethernet a outros computadores. Neste caso, foi conectado ao computador com o *Software Especialista*. A partir desse ponto, o *Sistema Especialista de Apoio à Operação* é dividido em três módulos. O módulo Configurador é responsável por capturar em um determinado momento alterações no estado dos equipamentos de manobra presentes nas subestações monitoradas e, além disso, integra as operações dos módulos de Diagnóstico e Recomposição. O módulo Diagnóstico é responsável por interpretar as informações de seqüência de eventos e identificar as possíveis falhas no sistema e também por repassar essas informações para o Módulo Recomposição. Ao final da execução, o módulo Recomposição apresenta ao operador um relatório com instruções detalhadas na tela para que seja possível restabelecer, da melhor maneira possível, a rede CELESC.

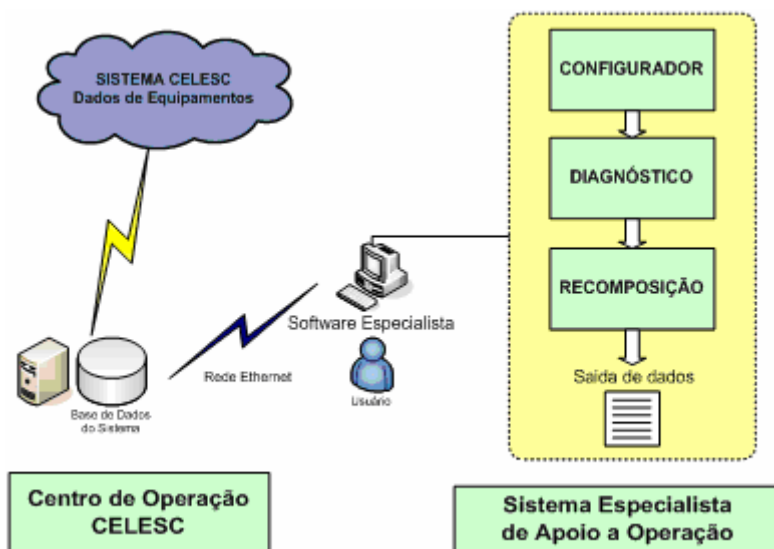


Figura 1 – Visão geral do Sistema

2.1 Banco de Dados e Interface Gráfica

Primeiramente, os dados oriundos do sistema CELESC são armazenados em um banco de dados localizado no Centro de Operação CELESC. A partir dessa base de dados realizou-se uma cópia dessas informações, pela equipe técnica da empresa CELESC, em um banco de dados ORACLE. Essa nova base de dados foi utilizada no estudo e no desenvolvimento de regras para o sistema de apoio ao diagnóstico e restauração.

Por representar uma cópia fiel dos dados originais, atualizada em tempo real e por questões de segurança, ou seja, para não comprometer em caso de falha o funcionamento do banco de dados, optou-se pela utilização da cópia do banco de dados ORACLE (ORACLE, 2007) durante o projeto do sistema.

Para possibilitar a consulta a este banco de dados no LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência, UFSC) foi utilizada a versão Oracle 10g Express Edition, a qual é uma nova versão da linha de banco de dados ORACLE 10g. Totalmente gratuita para desenvolvimento, distribuição e uso comercial. Ele é um banco de dados mais leve e foi desenvolvido utilizando o código base do ORACLE Database Server 10g Release 2.

Com o banco de dados instalado realizou-se a importação dos dados. Nesta segunda etapa foram filtrados os registros de interesse. A busca é feita através da Linguagem de Consulta Estruturada (*Structured Query Language - SQL*). As tabelas disponibilizadas são ilustradas na Figura 2 e comentadas logo em seguida (CUBE, 2003):

- **SDSC_MEDICAO:**
 - Possui cadastro de todos os equipamentos de medição analógicos monitorados de todas as subestações CELESC. Os equipamentos cadastrados nesta tabela são todos os que possuem grandeza variante no tempo, por exemplo, frequência, potência, temperatura, corrente, tensão e etc. O campo valor medição é atualizado *on-line* com o valor atual correspondente à grandeza analógica medida.
 - Um campo importante é o *CD_PONTO* que é o código do ponto de medição utilizado como fator de identificação em outras tabelas, por exemplo, *SDSC_EVENTLIST*.
- **SDSC_INDICACAO:**
 - Possui cadastro de todos os demais equipamentos não listados na tabela *SDSC_MEDICAO*, ou seja, equipamentos que informam o estado atual, por exemplo, ABERTO e FECHADO. Como na tabela *SDSC_MEDICAO* o campo *CD_PONTO* também é utilizado para identificação do equipamento nas demais tabelas. Os demais campos informam características da localização e estado dos equipamentos, por exemplo, subestação, subsistema, status atual e etc.
- **SDSC_SUBSISTEMA:**
 - Subsistemas cadastrados no SDSC.
- **SDSC_SUBESTACAO:**
 - Subestações cadastradas no SDSC.
- **SDSC_BAY:**
 - *Bays* cadastrados no SDSC.
- **SDSC_EVENTLIST:**
 - Quando ocorre alteração de estado de um equipamento ou ponto supervisionado, tanto da tabela *MEDICAO* quanto da tabela *INDICACAO*, é gerada uma nova linha na tabela *EVENTLIST*. Esta tabela está dimensionada para armazenar registros de até 32 dias passados. Através do campo *CD_PONTO* é possível localizar o equipamento, que sofreu mudança de status, em uma das tabelas (*MEDICAO* ou *INDICACAO*) e verificar seu status ou valor da grandeza atual.
- **SDSC_SOELIST:**
 - Contém as mesmas informações da tabela *EVENTLIST* adicionado de um campo com informação do tempo em milissegundo da alteração de status.
- **SDSC_CALLCENTER:**
 - Eventos para uso do *Call Center*.

A Figura 2 ilustra o relacionamento das tabelas monitoradas. Pode-se notar que as tabelas SDSC_INDICACAO e SDSC_MEDICAO possuem duas chaves estrangeiras (FK1), CD_SUBSISTEMA e CD_SUBESTACAO, herdadas da tabela SDSC_SUBESTACAO e outra chave estrangeira herdada da tabela SDSC_BAY (NR_BAY).

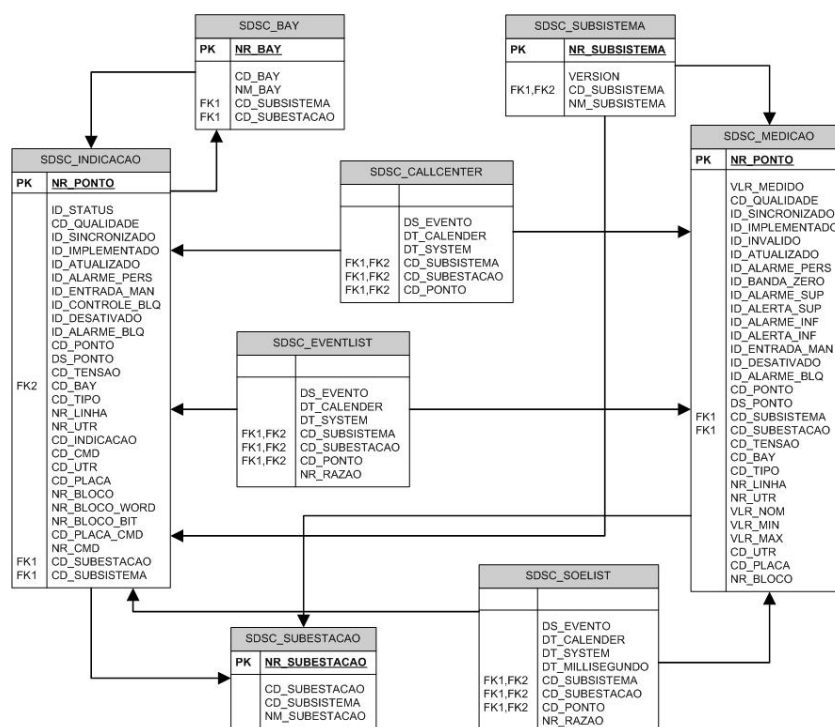


Figura 2 – Modelagem de Banco de Dados do Sistema Celesc

Esse relacionamento mostra que essas chaves herdadas só podem conter registros presentes na tabela PAI, ou seja, o campo SDSC_SUBESTACAO na tabela SDSC_INDICACAO OU SDSC_MEDICAO, por exemplo, só pode receber registros presentes na tabela SDSC_SUBESTACAO. Há outros relacionamentos como, por exemplo, entre as tabelas SDSC_EVENTLIST, SDSC_SOELIST e SDSC_CALLCENTER com as tabelas SDSC_INDICACAO E SDSC_MEDICAO.

Tendo o suporte à base de dados e o conhecimento necessário da base teórica das tabelas e dos dados, iniciou-se o desenvolvimento do módulo para configuração de rede. Para a construção desta ferramenta utilizou-se a plataforma de programação em linguagem C++ (ferramenta Borland Builder C++), uma linguagem de alto nível e código aberto. O algoritmo criado baseia-se na Teoria da Busca em Profundidade (*Depth-First*) (RABUSKE, 1992), associado à programação Orientada a Objetos.

2.2 Módulo Configurador

Após a ocorrência de distúrbios com desligamentos definitivos, a prioridade dos operadores é a restauração, o mais rapidamente possível, das partes do sistema elétrico que foram desligadas. Para isso é necessário seguir uma lista de procedimentos, que tem como primeiro passo a identificação do(s) componente(s) que estão em falta. Depois disso, deve-se efetuar as manobras necessárias para isolar o(s) componente(s) com defeito, pois pode ser preciso uma verificação do equipamento pela equipe de manutenção. Em seguida, restaurar as partes do sistema atingidas pelo desligamento, mas não as que estão em falta. Após isso é possível, se necessário, enviar a equipe de manutenção para o local para que o defeito possa ser corrigido. Finalmente, pode-se restabelecer as partes onde ocorreu o defeito.

É na primeira etapa que se faz importante uma visualização da topologia da rede elétrica, pois as imagens do sistema nos momentos pré e pós-falta ajudam na interpretação dos alarmes e tomada de decisões dos operadores. A visualização de quais foram os disjuntores que atuaram no momento do desligamento é um importante auxílio na tarefa de identificação dos componentes que estão em falta. Isso porque existe uma facilidade maior em assimilar as mudanças da rede através de imagens, reduzindo assim o tempo de execução desta tarefa.

O módulo do configurador desenvolvido é capaz de a partir das informações de estado dos disjuntores (aberto/fechado), mostrar ao operador a atual situação do sistema elétrico. Além da facilidade existente pela visualização da topologia, com esta ferramenta pode-se mapear quais barras estão interligadas ou mesmo saber se há casos de sistemas ilhados. Também é possível obter uma lista de equipamentos (linhas de transmissão, barramentos e transformadores) suspeitos de terem iniciado a contingência, bastando para isso comparar a topologia da rede antes e após a ocorrência. Os equipamentos desligados pela contingência formam o conjunto de elementos suspeitos para a análise posterior pela ferramenta de diagnóstico (CARDOSO JR, 2003).

Considerando que a CELESC não monitora o estado das chaves, apenas os disjuntores são considerados para execução do configurador. Alguns disjuntores de subestações de terceiros não são monitorados, dificuldade contornada estimando o estado destes disjuntores a partir da análise de grandezas analógicas, tais como os fluxos e tensões nas linhas de transmissão. O configurador deve ser executado sempre que houver mudança do estado de um ou mais disjuntores do sistema protótipo.

2.3 Módulo de Diagnóstico

A etapa de diagnóstico do sistema visa analisar seqüências de eventos relacionadas a atuações de relés e disjuntores, identificando o equipamento que originou a falta. O programa responsável por esta tarefa é um sistema especialista baseado em regras com prioridades com busca em profundidade. Um conjunto de regras (módulo) foi desenvolvido para interpretar eventos de cada equipamento possível de desligamento (transformadores e linhas de transmissão).

Antes de iniciar-se a implementação da base de conhecimento deste módulo, foi necessário um estudo sobre a filosofia de proteção empregada pela empresa para transformadores e linhas de transmissão nos níveis de tensão do sistema protótipo, assim como uma análise de quais informações são disponibilizadas nas seqüências de eventos.

O módulo de diagnóstico identifica o equipamento que iniciou os desligamentos e informa se algum transformador deve permanecer bloqueado aguardando verificação por equipes de manutenção.

2.3.1 Filosofia de Proteção para Transformadores de Potência

Realizou-se a análise de documentos dispostos pelo departamento de Operação do Sistema Elétrico (DPOP) e Divisão de Estudos da Operação (DVEO) da CELESC. Através desse estudo, foi possível compreender as situações de bloqueio dos disjuntores. Para melhor entendimento, uma situação é exemplificada abaixo:

- Os relés de sobrecorrente (50 e 51), ao detectar uma falta, provocam a abertura dos disjuntores da seguinte maneira:
 - Sobrecorrente de Neutro: os disjuntores da alta (DJ AT), média (DJ MT) e baixa tensão (DJ BT) são desligados;
 - Sobrecorrente na Alta Tensão (138kV): os disjuntores da alta (DJ AT), média (DJ MT) e baixa tensão (DJ BT) são desligados;
 - Sobrecorrente na Média Tensão (69kV): somente o disjuntor da média tensão (DJ MT) é desligado;
 - Sobrecorrente na Baixa Tensão (13,8kV): somente o disjuntor da baixa tensão (DJBT) é desligado;
- Os dispositivos 71 (nível de óleo), 20 (válvula de alívio de pressão), 26 e 49 (sensores de temperatura) provocam apenas alarmes, não implicando no desligamento nem bloqueio do transformador.
- Os relés 87 (relé de proteção diferencial) e 63 (relé de nível de líquido ou de gás), ao detectar uma falta, provocam além de alarmes e desligamento dos disjuntores, o bloqueio do transformador.

As regras para diagnóstico de transformadores foram elaboradas considerando atuações coerentes das proteções e disjuntores. Para o diagnóstico foram consideradas 4 hipóteses: falta interna (F.I.), falta externa (F.E.), problema no disjuntor (P.D.) e sem falta (S.F.). Vale ressaltar que há algumas diferenças entre a filosofia de proteção dos transformadores 138/69 kV do sistema do Vale do Itajaí da CELESC, que levaram à necessidade de inclusão de regras específicas para alguns casos. Considerando-se por exemplo a seguinte seqüência de eventos:

- BGA 138 AT-TT1 RELE DIFERENCIAL 87D ATUADO
- BGA 138 AT-TT1 RELE DE BLOQUEIO 86T ATUADO
- BGA 138 AT-TT1 DISJUNTOR DJ ABERTO
- BGA 69 BT-TT1 DISJUNTOR DJ ABERTO

Esta situação é diagnosticada pelo sistema especialista como falta interna no transformador AT-TT1 da Subestação de BGA, com atuação do relé diferencial e abertura dos disjuntores de alta e baixa tensão.

2.3.2 Filosofia de Proteção das Linhas de Transmissão

Para o desenvolvimento do módulo de diagnóstico de faltas em linhas de transmissão de 138kV e 69 kV também foram utilizados documentos dispostos pelo Departamento de Operação do Sistema Elétrico (DPOP) e Divisão de Estudos da Operação (DVEO) da CELESC.

Para melhor entender a filosofia de proteção das linhas de transmissão, foram realizados estudos básicos sobre os relés específicos da proteção, dentre os quais destacam-se:

Relé 21: Relé de Distância;

Relé 79: Relé de Religamento;

Relé 67/67N: Relé de Sobrecorrente Direcional de Fase e de Neutro;

Relé 85: Relé de Teleproteção

Relé 87: Relé Diferencial de Linha

Identificados os possíveis alarmes, foram elaboradas as regras que traduzem a filosofia da proteção de linhas. Para diagnóstico da ocorrência em uma linha de transmissão, são utilizadas informações dos seus dois terminais.

Como exemplo, na figura 3 é apresentada a linha de transmissão que liga a subestação Ibirama (IRA) a Timbó (TBO).

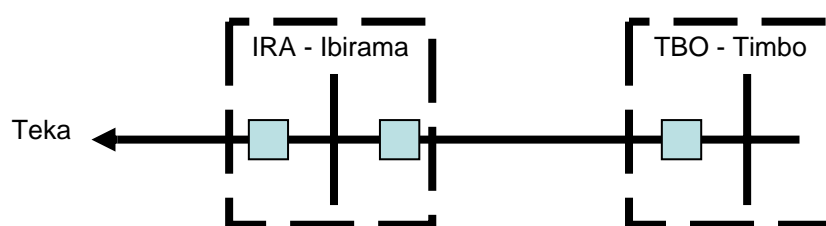


Figura 3 – Diagrama Simplificado

As proteções nos dois terminais que atuam sobre os seus respectivos disjuntores de linha são: relé de religamento (79), relé de distância (21) e relé direcional de neutro (67N). Suponha a seqüência de eventos a seguir, onde PARTIU significa que o relé 21 foi sensibilizado e OPERACAO a sua devida atuação. O sistema especialista a partir destes dados chega à conclusão que houve falta na linha LT – IRA-TBO e que os relés 21, tanto de IRA quando de TBO, operaram em primeira zona.

- IRA 69 LT-TBO RELE 21 FASE A PARTIU 21A ATUADO
- TBO 69 LT-IRA RELE 21 FASE A PARTIU 21A ATUADO
- IRA 69 LT-TBO RELE 21 OPERACAO 21D ATUADO
- TBO 69 LT-IRA RELE 21 OPERACAO 21D ATUADO
- IRA 69 LT-TBO DISJUNTOR DJ ABERTO
- TBO 69 LT-IRA DISJUNTOR DJ ABERTO

Já para uma ocorrência de um religamento bem sucedido após uma falta na linha com a atuação do relé 67N, a seqüência de eventos seria da seguinte maneira:

- IRA 69 LT-TBO RELE 67 NEUTRO 67N ATUADO
- IRA 69 LT-TBO DISJUNTOR DJ ABERTO
- IRA 69 LT-TBO RELE RELIGAMENTO 79R ATUADO
- IRA 69 LT-TBO DISJUNTOR DJ FECHADO

Neste caso não haveria a necessidade de execução do sistema especialista, já que não haveria desligamento definitivo.

2.3.3 Análise do Banco de Dados

Como diversos alarmes não são necessário para o diagnóstico da ocorrência, são filtrados apenas os mais relevantes a esta tarefa, de forma a aperfeiçoar o diagnóstico, representando situações pertinentes à operação real do sistema e excluir os casos menos comuns.

Dentre os bancos de dados de cada subestação analisados destacam-se duas:

1. *sdsc_indicacao*: que indica os alarmes referente ao relés, disjuntores e outros indicadores. Nesse caso é apresentado o estado atual de cada alarme;
2. *soe_list*: que representa a seqüência de todos os eventos registrados ao longo de um certo período de tempo. Essa lista serve como a base do processo de diagnóstico.

2.3.4 Programação em CLIPS

O CLIPS (*C Language Integrated Production System*), de domínio público, é uma ferramenta para o desenvolvimento de sistemas especialistas. O software foi desenvolvido em 1984 pela NASA Johnson Space Center (RILEY, 2007). Para este projeto, foi utilizada a programação baseada em regras. Nessa programação incluem-se os seguintes itens:

- Acesso a arquivos de fatos. Nesse caso a seqüência de eventos gerada pelo configurador representa a memória global dos dados;
- Base de conhecimento (contendo todas as regras dos módulos);
- Motor de inferência: controla a aplicação do desencadeamento de regras por prioridades com base nos fatos e objetos existentes.

Para compreensão da linguagem CLIPS, considere o início da estrutura da regra *sobrefase*:

(defrule sobrefase

(ALMT(subestacao ?SE1)(trafo ?TT)(nivel ?nivA)(tipo ?tp1)(estado ATUADO))

(ALMT(subestacao ?SE1)(trafo ?TT)(nivel ?nivA)(tipo ?tp2)(estado ABERTO))

(ALMT(subestacao ?SE1)(trafo ?TT)(nivel ?nivB)(tipo ?tp3)(estado ABERTO))

=>

...

Nesse caso, temos a instância ALMT (alarme de transformador) e cinco atributos relacionados a essa: *subestação*, *trafo*, *nivel*, *tipo* e *estado*. É chamado fato, a instância com valores registrados em seus atributos. Assim a regra procede apenas se esses três fatos forem obedecidos. Note que nesse caso o atributo *trafo* deve ser igual à mesma variável ?TT , o que não necessita ser necessariamente no atributo *tipo* com variáveis distintas: ?tp1, ?tp2, e ?tp3. Já o atributo *estado* compara valores (ATUADO ou ABERTO).

O módulo do diagnóstico inicia carregando o arquivo *alarmes.dat* gerado pelo configurador, que contém a seqüência de eventos a ser analisada. Os eventos são convertidos em fatos dando início ao sistema especialista. A saída do módulo é representada por dois arquivos textos de saída:

- *diagnostico.dat* - que será utilizado para informações ao operador, com o resultado do diagnóstico. Este arquivo armazena todas as análises das ocorrências formando um histórico dos eventos.
- *DJ.dat* - Armazena os equipamentos a serem bloqueados que será utilizado como informação auxiliar do módulo de Recomposição.

2.4 Módulo de Recomposição

O módulo de recomposição do sistema de apoio tem a finalidade de auxiliar o operador no restabelecimento total ou parcial do sistema, levando em consideração a fase fluente da recomposição. Esta é a última etapa do programa, objetivando a recomposição total ou parcial do sistema elétrico baseado em análises de ocorrências. Para a execução deste módulo, foram utilizadas técnicas de Inteligência Artificial, com ênfase no desenvolvimento de Sistemas Especialistas. Optou-se pela mesma linguagem do módulo de diagnóstico, o CLIPS, para uma maior facilidade de iteração entre os módulos.

O princípio de funcionamento deste sistema especialista consiste em receber um arquivo de dados com as informações de estado de disjuntores, realizar um processo de inferência entre fatos e regras e gerar um arquivo de saída, contendo as manobras de recomposição. O sistema deve reconhecer contingências como bloqueio ou desarme de disjuntores referentes às linhas de transmissão e transformadores, e apresentar medidas corretivas (SARTOR FILHO, 2002).

A base de conhecimento do módulo foi baseada nas Instruções de Operação (IOs) e Estudo de Operação (EO) da concessionária, além da experiência adquirida pelos operadores que trabalham no sistema escolhido para teste, estabelecendo os procedimentos e manobras que auxiliarão o operador a recompor o sistema de forma segura. Estes conhecimentos são imprescindíveis para a criação das regras do sistema. Os elementos da rede monitorados pelo configurador, disjuntores e pontos de medição de tensão das linhas de transmissão e subestações, constituem a lista de fatos do sistema especialista.

A estrutura de fatos criada com o intuito de classificar os disjuntores é descrita a seguir:

(DJ (id XX)(id2 XX)(subestacao XX)(tipo XX)(rele XX)(estado XX)(bloqueio XX))

- *id*: identificação dos disjuntores pela numeração do configurador de rede;
- *id2*: identificação dos disjuntores pela numeração do banco de dados da CELESC;
- *subestacao*: identificação da localização dos disjuntores por subestação, objetivando facilitar a implementação e manutenção do programa, podendo ser *BND*, *BSO*, *BGA*, *TBO*, *IRA*, *IAL*, *RSD*, *RSL*, *RSD*, *BBV*, *BRB*, *BRQ*, *IIA* ou *IAA* (ver figura 5);
- *tipo*: identifica se o disjuntor referido se destina à proteção de linha de transmissão (*LT*) ou alta (*AL*) e baixa (*BT*) tensão dos transformadores, além de média tensão (*MT*) no caso de transformadores de três enrolamentos;
- *rele*: indica se o disjuntor atuou devido à ação de um relé de proteção (*21*, *27*, *50/51*, *50/51N*, *63*, *67*, *67N*, *86*, *87*) ou por teleproteção (*TELE*). No primeiro caso, como o relé de atuação é

indiferente ao módulo de recomposição, este campo deve ser preenchido com *nil* na programação;

- *estado*: campo que admite valores 0, 1, 2 e 3 para representar o estado do disjuntor como erro de estado, fechado, aberto ou erro de estado, respectivamente. Os erros de estado não são considerados como estados válidos para recomposição, sendo utilizados apenas os estados 1 e 2 para atuação das regras;
- *bloqueio*: campo que admite dados *SIM* ou *NÃO* para representar o estado de bloqueio ou não do disjuntor, respectivamente. O estado *SIM* não implica na existência do relé 87 (relé de bloqueio), podendo este estado ser determinado na etapa de diagnóstico para indicar a impossibilidade de religamento, por perda da linha ou transformador ou manutenção dos mesmos.

A utilização da estrutura anterior assume a premissa da existência de tensão para recomposição. Para os pontos de identificação da presença ou não de tensão, outra estrutura é criada, sendo executada apenas uma vez por barramento do sistema, é representada como:

(TENSAO (ponto XX)(SE XX)(nível XX)(valor XX)

- ponto: identificação do ponto de medição do banco de dados da CELESC;
- SE: identifica a subestação onde está sendo medida a tensão, podendo assumir os mesmos caracteres da estrutura *subestação* descrita anteriormente;
- nível: identificação do nível de tensão nominal (138 ou 69) do barramento, em kV. A utilização deste campo na mesma estrutura que o campo *SE* justifica-se pela existência dos dois níveis de tensão em determinadas subestações;
- valor: medição da tensão no barramento, em kV.

3. Camada Aplicação

A camada de aplicação ilustrada na Figura 4 mostra o ambiente responsável pela integração dos módulos Configurator, Diagnóstico e Recomposição.

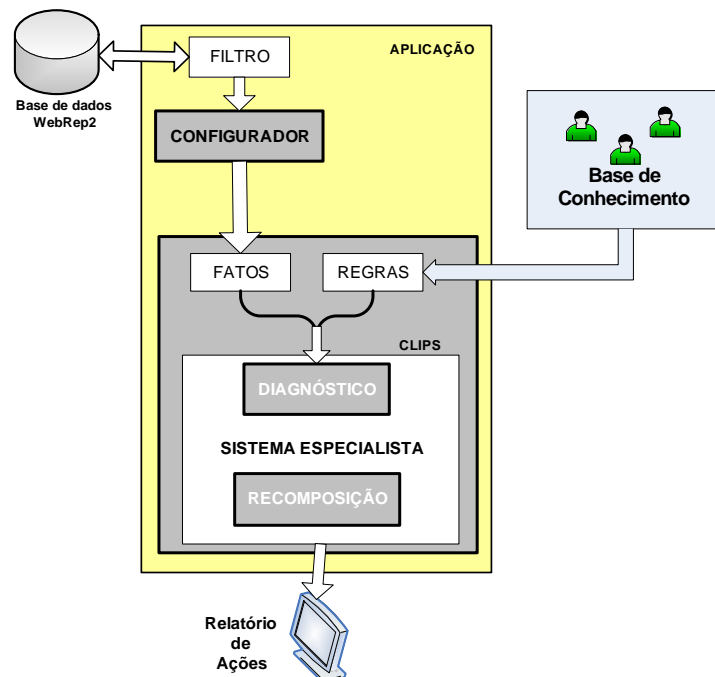


Figura 4 – Visão geral do Sistema Especialista

Esta camada trata das regras de comunicação entre os módulos e é responsável pelo controle de acesso e filtro das informações da Base de Dados WebRep2 (base de dados fornecida pela equipe técnica da CELESC). A função do filtro é de realizar um condicionamento das informações da base de dados da CELESC (WebRep2), o que possibilita ao operador selecionar quais equipamentos e/ou informações presentes no conjunto de subestações incluídas no escopo de desenvolvimento deste trabalho serão monitorados ou serão necessárias para a atuação do sistema especialista.

Na tela principal do programa Configurador de Rede pode-se visualizar o sistema esquematizado, com a representação das subestações, suas linhas e disjuntores. Para que o configurador seja atualizado, o usuário deve clicar no botão ‘atualizar’ na tela principal. Então, a mensagem “ATUALIZADO” aparece, confirmando a atualização da configuração da rede.

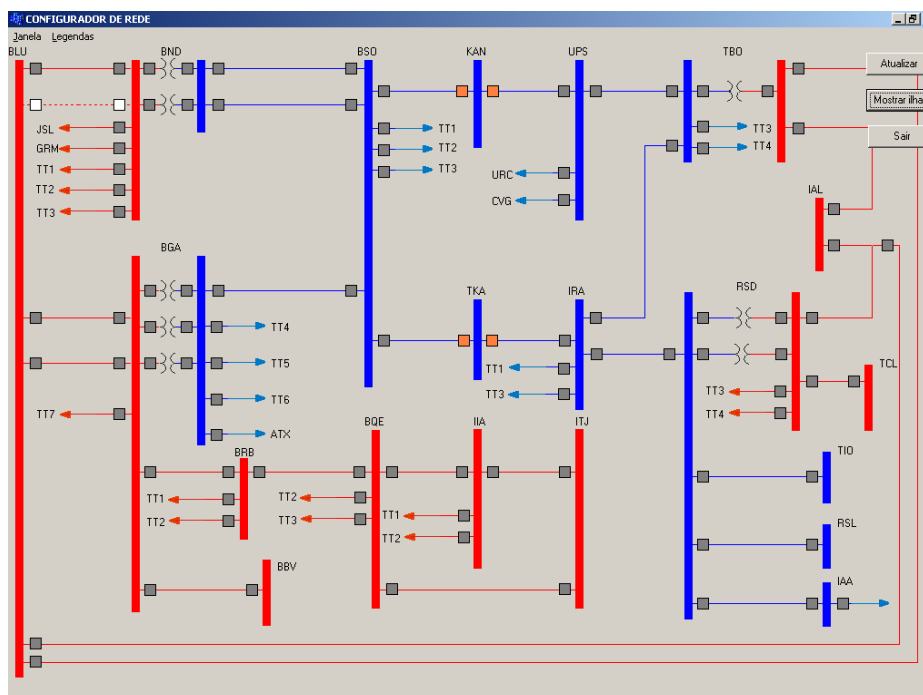


Figura 5 – Configurador de Rede

O conhecimento adquirido foi armazenado na base de conhecimento na forma de regras, representadas em ações precedentes e conseqüentes, ou seja, necessita de um elemento condicional para ativar uma regra e proceder com uma ação correspondente a regra ativada. Os fatos do sistema especialista são os dados ou informações que são necessários para ativar o mecanismo de inferência do sistema especialista, que combina os fatos com as regras implementadas.

No final da análise é emitido para o operador um relatório mostrando as possíveis falhas e a maneira como o sistema deve ser recomposto.

4. Estudo de Caso

Considere uma falta na Linha de Transmissão RSL-RSD. Nesse caso supõe-se que houve uma falha na abertura do disjuntor de RSD. Conseqüentemente, devido ao ajuste da proteção do sistema, houve a abertura dos disjuntores de IRA que liga à RSD, e também dos disjuntores de baixa tensão dos transformadores TT1 e TT2 da subestação RSD. (Figura 6).

Os fatos do arquivo *alarmes.dat* foram:

(ALML(id2 1037)(id nil)(subestacao RSD)(nivel LT)(linha RSL)(tipo 51F)(estado ATUADO))

(ALML(id2 17016)(id nil)(subestacao RSL)(nivel LT)(linha RSD)(tipo 51F)(estado ATUADO))

(ALML(id2 17015)(id 1815)(subestacao RSL)(nivel LT)(linha RSD)(tipo DJ)(estado ABERTO))
 (ALMT(id2 17850)(id nil)(subestacao RSD)(trafo TT-2)(nivel BT)(tipo 51A)(estado ATUADO))
 (ALMT(id2 1088)(id 15141)(subestacao RSD)(trafo TT-2)(nivel BT)(tipo DJ)(estado ABERTO))
 (ALMT(id2 17846)(id nil)(subestacao RSD)(trafo TT-1)(nivel BT)(tipo 51A)(estado ATUADO))
 (ALMT(id2 1080)(id 1514)(subestacao RSD)(trafo TT-1)(nivel BT)(tipo DJ)(estado ABERTO))
 (ALML(id2 9218)(id nil)(subestacao IRA)(nivel LT)(linha RSD)(tipo 67A)(estado ATUADO))
 (ALML(id2 9215)(id 2115)(subestacao IRA)(nivel LT)(linha RSD)(tipo DJ)(estado ABERTO))

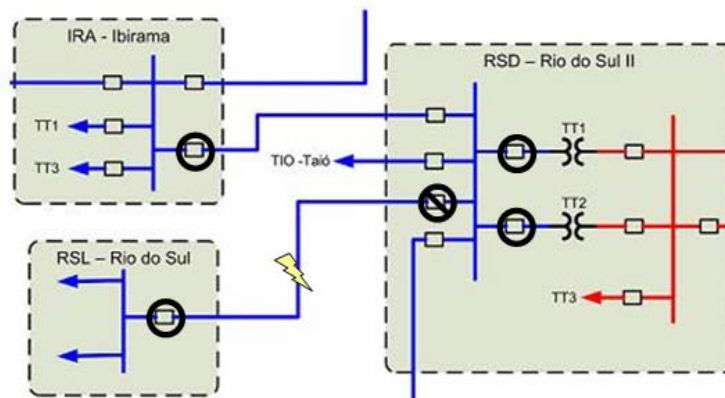


Figura 6 – Caso de Estudo

Nessa parte, o sistema identifica as falhas e descreve os possíveis problemas (camada Diagnóstico) para que a camada Recomposição possa utilizar esses dados e montar uma estrutura, baseada em regras, para que seja possível a recomposição do sistema, mostrando na tela as instruções de recomposição do sistema para o operador.

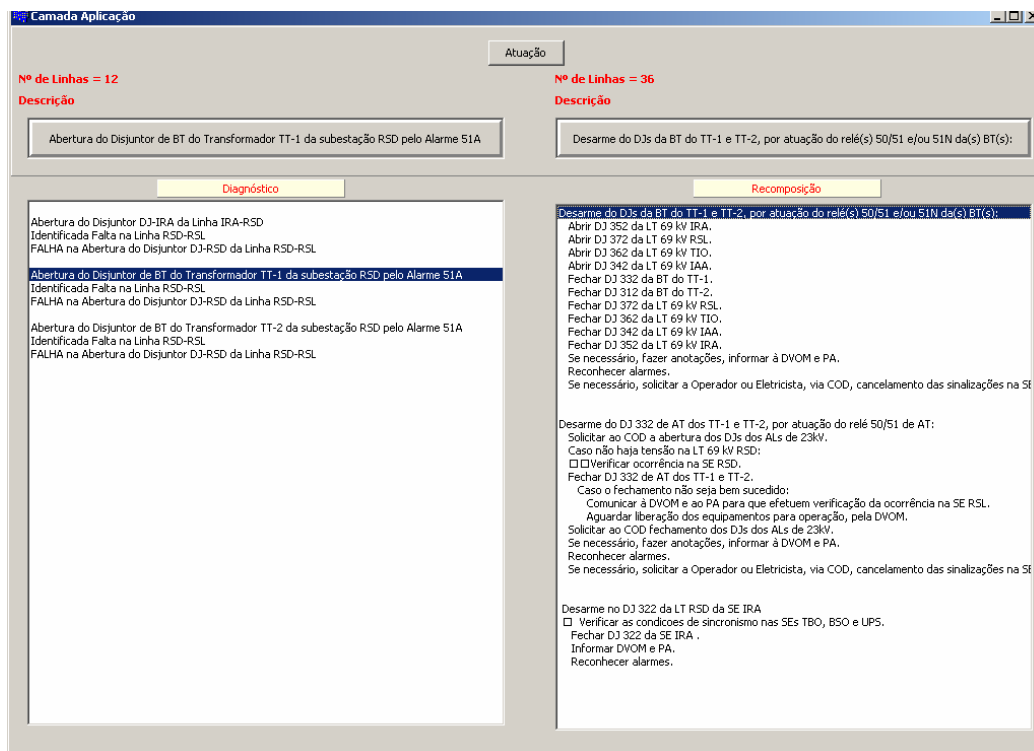


Figura 7 – Interface

A Figura 7 contém o botão “Atuação” responsável pelo processo de inicialização do sistema especialista, neste caso CLIPS. Quando se clica nesse botão é feita uma chamada no Builder C++, no evento OnClick do botão. Na primeira coluna é apresentada a descrição do módulo Diagnóstico e na segunda coluna a parte referente ao módulo Recomposição. Nesse exemplo, foi diagnosticada uma falta na linha RSL – RSD. Identificou-se que houve uma falha na abertura do disjuntor de RSD e que a abertura dos demais disjuntores auxiliou na identificação da falta ocorrida.

A etapa de recomposição aciona três regras distintas a partir dos dados obtidos na etapa de diagnóstico. Seguindo a prioridade previamente definida, a primeira regra atuada trata dos disjuntores de baixa tensão dos transformadores na subestação RSD. Nesta regra, é necessário a abertura dos disjuntores de baixa tensão da subestação RSD para fechamento dos disjuntores de baixa tensão dos transformadores de Rio do Sul II.

Em seguida, ativa-se a regra de recomposição da subestação RSL e, por fim, recompõe-se o disjuntor referente à subestação IRA. Isto porque a subestação IRA pode suprir normalmente seu carregamento com a disponibilidade da linha de transmissão TBO-IRA.

4. Conclusões

Foi apresentado neste artigo um sistema computacional que visa dar apoio à operação de um conjunto de subestações em situações de emergência, ou seja, após a ocorrência de contingências com desligamentos definitivos. O principal objetivo desta ferramenta é acelerar os processos de diagnóstico e recomposição e ao mesmo tempo minimizar o risco de falha humana nestas atividades.

Este sistema possui um configurador que verifica quais as partes do sistema que foram afetadas pelo desligamento, um segundo módulo que analisa a seqüência de eventos dos equipamentos envolvidos no desligamento e um terceiro que apresenta a seqüência de manobras para recomposição da rede.

Por questões de segurança, este sistema não trabalha diretamente com o banco de dados do sistema de monitoramento e controle e sim com uma cópia do mesmo gerada automaticamente.

O fato das regras utilizadas na base de conhecimento do sistema serem baseadas em instruções de operação e na experiência de especialistas em proteção e operadores, torna a ferramenta de fácil aceitação.

5. Referências Bibliográficas

CARDOSO Jr, G., *Estimação da Seção em Falta em Sistemas Elétricos de Potência via Redes Neurais e Sistemas Especialista Realizada em Nível de Centro de Controle*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

CUBE., *Cube sc Information Systems: Tabelas WebRep 2 – 0395-017/2003*, 2003.

GIARRATANO, J., RILEY G. *Expert Systems: Principles and Programming*, Boston, MA, USA, Third Edition, ITP, 1998.

ORACLE., Oracle Database 10g Express Edition Data Sheet. Acesso em: 10 Março 2007, disponível em: http://www.oracle.com/technology/products/database/xe/pdf/dbxe_datasheet.pdf

RABUSKE, Márcia A., *Introdução à teoria dos grafos*, Florianópolis, Editora da UFSC, 1992.

RILEY, Gary., *CLIPS: A Tool for Building Expert Systems*, Disponível em: <http://clipsrules.sourceforge.net/>. Acesso em: 20 Março 2007.

SARTOR FILHO, A., *Sistema Especialista para Auxílio à Recomposição de Subestações de Transmissão na Fase Fluente*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.