

UM PROCESSADOR DE ALARME INTELIGENTE

Evandro de Oliveira Araújo
Departamento de Eletrônica
Escola de Engenharia UFMG
R. Esp.Santo, 35 3º andar
CEP 30160-030 Belo Horizonte - MG

Júlio César Braz Queiroz
Departamento de Eletrônica
PUC.MG

Davidson Geraldo Ferreira
Div. de Estudo e Suporte à Operação do Sistema
Companhia Energética de Minas Gerais CEMIG
Av. Barbacena. 1200 Belo Horizonte - MG

RESUMO: Este artigo apresenta um Sistema Especialista protótipo para Tratamento de Alarmes (SETA) para sistemas do tipo SCADA (Supervision Control and Data Acquisition). Este sistema é baseado no conhecimento dos operadores do sistema elétrico. Um Simulador de eventos foi desenvolvido para gerar ocorrências de alarmes. Há três modalidades de geração de alarmes: aleatória, manual, através de um arquivo de alarmes previamente montado. Através deste último modo de simulação, foi possível reproduzir situações de emergência ocorridas num sistema elétrico real e os resultados obtidos com a utilização do sistema SETA foram bastante satisfatórios.

ABSTRACT: This paper describes the prototype of a intelligent alarm processing system for SCADAS systems. This system is based on the knowledge of power system operators. A simulator of events was built to generate alarms in three different ways: manually, randomly, through a file of events. The results obtained in the simulation of a real electric power system emergency were very encouraging.

1 - INTRODUÇÃO

Diversos trabalhos têm sido publicados sobre a aplicação de técnicas de Inteligência Artificial a Sistemas Elétricos de Potência desde o aparecimento do artigo de Wollenberg (1986). Uma revisão bibliográfica sobre o assunto pode ser encontrada em Zhang *et alii*, (1989). Uma introdução aos fundamentos de Inteligência Artificial pode ser encontrada em Nilsson (1982) e às técnicas de Sistemas Especialistas, em(Hayes-Roth 1983; Bratko 1990). Será abordado neste artigo o problema do

tratamento de alarmes num Centro de Controle, uma das importantes aplicações de Sistemas Especialistas a Sistemas Elétricos de Potência.

Em trabalhos publicados sobre este problema(Bijoch *et alii* 1989; Prince *et alii* 1989; Heydeman e Harrewijn 1989; Christie 1991), encontramos a descrição de características desejadas de um processador de alarmes e comparações de desempenho entre diferentes ferramentas computacionais de desenvolvimento. Detalhes importantes da implementação do sistema, não são contudo revelados. A maioria destes trabalhos trata de casos bastante simples, acadêmicos. Neste artigo, descreveremos o trabalho realizado em convênio com a Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG que resultou na implementação de um Sistema Especialista para Tratamento de Alarmes (SETA). Após a caracterização do problema estudado, são descritos as fases de desenvolvimento deste Sistema Especialista, o Simulador de eventos do sistema (cuja função é gerar os alarmes) e alguns resultados de simulação. Finalmente, são apresentadas algumas vantagens e limitações do sistema e as conclusões do trabalho.

2 - O PROBLEMA DE TRATAMENTO DE ALARMES

Um dos problemas mais comuns nos centros de operação dos sistemas elétricos é a apresentação adequada dos alarmes aos operadores. Na ocorrência de falhas no sistema elétrico (provocadas, por exemplo, por tempestades) pode ser gerado um número excessivo de alarmes. Nestes momentos críticos, é frequentemente impossível ao operador analisar o estado do sistema de potência a partir das mensagens de alarme e tomar as decisões apropriadas. Nestes casos, a degradação de operação do sistema elétrico pode resultar em interrupções prolongadas no fornecimento de energia provocando perdas econômicas importantes e uma insatisfação geral no consumidor.

* Artigo submetido em 06-04-93

1ª revisão em 10-04-93; 2ª revisão em 04-08-93;

Aceito sob recomendação do Ed.Cons. Prof.Dr Fernando A.C.Gomide

O problema do processamento de alarmes em centros de controle é muito complexo, e não tem sido resolvido de maneira satisfatória com a utilização de técnicas convencionais de programação. O sistema SETA utiliza uma metodologia baseada em Conhecimento, através do uso de uma linguagem de alto nível como o dialeto Arity Prolog. A adoção da linguagem Prolog tornou possível a representação do conhecimento informal de operadores experientes de uma maneira simples e a obtenção de soluções eficientes para o problema do processamento de alarmes.

O Sistema SETA tem como objetivo efetuar uma análise contínua dos alarmes recebidos, tratá-los e apresentá-los aos operadores de maneira concisa, relatando a condição do sistema. A finalidade não é substituir o processamento de alarmes existente, mas complementá-lo, de forma a torná-lo uma ferramenta mais útil à operação.

3 - ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA SETA

3.1 - Aquisição de Conhecimento

Análises realizadas pelos engenheiros ligados ao centro de operações permitiram concluir, preliminarmente, que as seguintes categorias, citadas abaixo, são as responsáveis pelo maior volume de alarmes:

- alarmes decorrentes da operação de dispositivos (abertura e fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras);
- alarmes decorrentes da atuação de dispositivos de proteção;
- alarmes decorrentes de violações de limites das grandezas elétricas (tensão, potências ativa, reativa e aparente).

Com base nessas informações iniciais, uma ampla pesquisa foi realizada junto aos operadores e engenheiros de supervisão. Foram formulados questionários visando a obtenção de uma avaliação geral do sistema atual e a confirmação da importância dos alarmes citados acima. A seguir, são apresentados alguns resultados da pesquisa:

- A maioria dos especialistas considerou o sistema atual bom. Entretanto, foi sugerida a eliminação de alguns alarmes, principalmente durante as situações de emergência, e a elaboração de textos mais claros;
- Os alarmes considerados mais importantes foram os do tipo abertura e fechamento de dispositivos e violação de limites tanto em regime normal como em regime de emergência;

Em relação às características desejáveis para um processador de alarmes, apontadas no questionário, podemos citar:

- Durante as perturbações do sistema elétrico, devem ser apresentadas somente mudanças de estado e violação de limites;
- Deve ser mantida na tela de resumo de alarmes somente a ocorrência mais recente para um mesmo equipamento;

- A monitoração de carregamento deve ser feita através de potência aparente devendo ser eliminadas as medidas de potência ativa e reativa;
- Na ocorrência de retorno aos limites normais de operação de um equipamento, deve ser eliminado o alarme de limite violado enviado anteriormente, caso o mesmo não tenha sido reconhecido ou eliminado;
- Quando ocorrerem alarmes do tipo violação de tensão em diferentes níveis de tensão em uma determinada subestação, devem ser eliminados os alarmes dos níveis considerados menos importantes à operação;
- Na ocorrência simultânea de violação nos limites de tensão de barramentos de uma área específica do sistema elétrico deve ser enviado um único alarme informando que a área está com problema generalizado de tensão.

3.2 - Representação de Conhecimento

Diferentes modelos de representação de conhecimento têm sido propostos. A conveniência de se utilizar um modelo ou outro depende fortemente do domínio do problema e das ferramentas computacionais disponíveis.

Para a representação das instalações do sistema elétrico foram usados "frames". Os frames são formados de objetos e atributos associados ("slots"). É um modelo de representação de conhecimento bastante poderoso e versátil; ele reúne as vantagens da representação de natureza declarativa com a eficiência da representação por procedimentos. A utilização de frames no nosso sistema é ilustrada abaixo:

```

FRAME GERAL → Instalações do sistema elétrico
FRAME PRINCIPAL → Subestação (ou Usina) A
Mnemônico : SE A
Nível de tensão : 500 (kV)
Número da instalação : 1
Número de dispositivos : 18
Número de equipamentos conectados : 11
Nome completo : Subestação A
Área em que está situada : Central
FRAME SECUNDÁRIO → Dispositivo (ou Equipamento)
Número do dispositivo : 1
Nome do dispositivo : D1U4
Conexões : barra 01
           It AB
Estado : energizado
  
```

Nas representações utilizadas no SETA, foram selecionadas 34 instalações, usinas e subestações da rede do sistema elétrico, que compõem um frame geral. Cada uma destas instalações constitui um frame principal, que leva o seu nome. Ao frame principal estão associados diversos frames secundários, que representam os diversos dispositivos (disjuntores e chaves seccionadoras) e equipamentos das instalações.

O sistema SETA faz também uso de regras de produção, para a representação do conhecimento dos operadores. As regras são sentenças do tipo **Se** <Condições> **Então** <Conclusões>. A figura 1 é um exemplo de uma regra associada a uma instalação ilustrada.

Esta regra estabelece nos seus antecedentes as condições de os quatro dispositivos terminais estarem abertos para se concluir que o equipamento está desenergizado. Na execução desta regra são disparados os frames relativos aos dispositivos envolvidos

na subestação em questão. Esta forma de recuperar informação se mostrou bastante eficiente na utilização do sistema.

3.3 - Formalização de Conhecimento

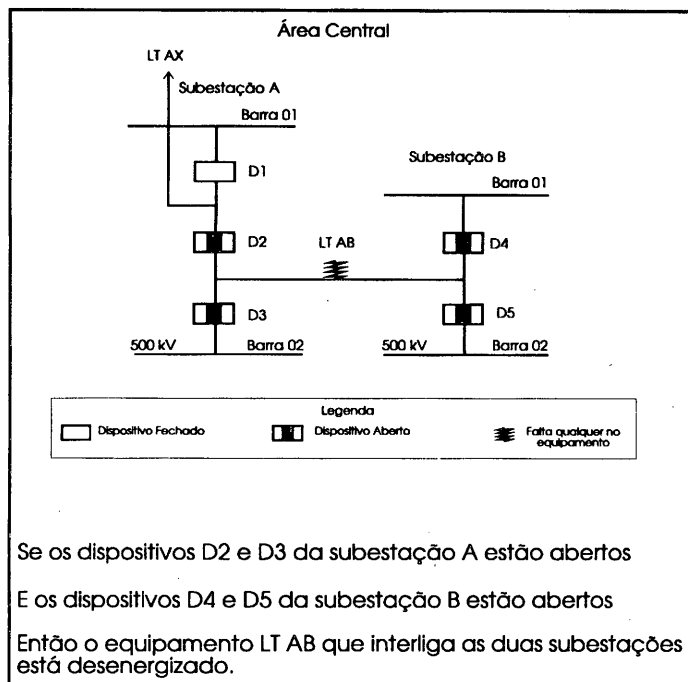


Figura 1 - Exemplo de uma instalação e a regra associada

O dialeto escolhido para a formalização de Conhecimento foi o ARITY/PROLOG, versão 5.1. Com o uso de uma linguagem de processamento simbólico foi possível representar de maneira bastante natural o conhecimento informal dos especialistas e fazer as inferências necessárias. O hardware básico contou com um processador 80486, 33 MHz, dois megabytes de memória RAM, unidades de disco rígido e flexível, monitor de vídeo colorido e impressora.

4 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ESPECIALISTA SETA

A arquitetura do sistema é apresentada na figura 2.

4.1 - Simulador de Eventos

O sistema SCADA executa a tarefa de coletar dados a intervalos cíclicos de tempo junto às subestações e usinas do sistema elétrico considerado. Em função do protótipo não estar ainda integrado ao sistema SCADA, um simulador de eventos foi desenvolvido para gerar as seguintes categorias de alarme :

- a Alarmes de topologia: abertura e fechamento de disjuntores e chaves seccionadoras; desenergização e energização de equipamentos como geradores, transformadores e linhas de transmissão.
- b Alarmes de violação de grandezas elétricas: violação de limites de tensão em barras de subestações e usinas; violação de limites de potência ativa, reativa e aparente

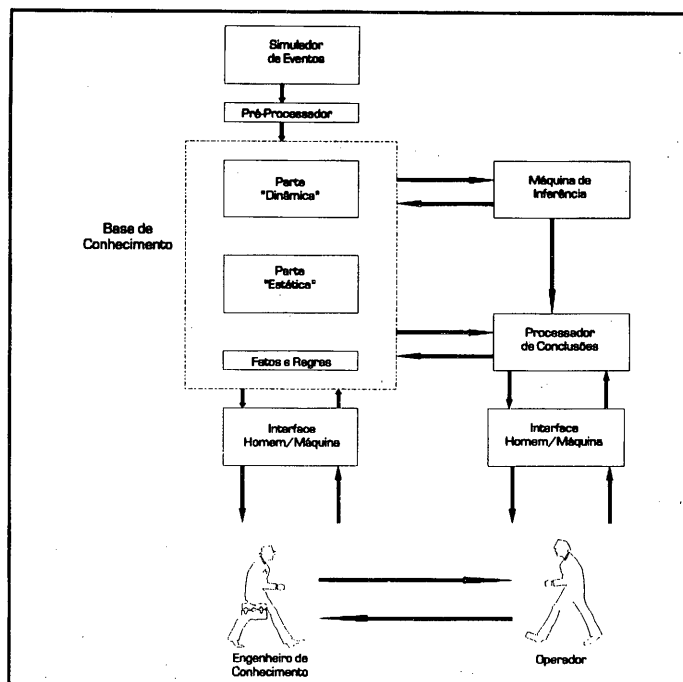


Figura 2 - Arquitetura do sistema especialista SETA

dos equipamentos do sistema elétrico (linhas de transmissão e transformadores); retorno aos limites normais de operação.

Os alarmes podem ser gerados de três modos distintos :

- a **MANUAL**: os dispositivos e equipamentos cujos parâmetros serão alterados são escolhidos um a um, dispostos em listas para cada subestação ou usina.
- b **AUTOMÁTICO**: o sistema protótipo escolhe uma área do sistema elétrico. Em seguida escolhe subestações e usinas localizadas nesta área, para então escolher os componentes que terão seus parâmetros alterados. Todas as escolhas são realizadas de forma aleatória.
- c **CENÁRIOS**: conjuntos de alarmes podem ser montados em editores de programa visando simular, por exemplo, situações já ocorridas.

4.2 - Pré-Processador

O conjunto de alarmes a ser tratado, independentemente do modo como foi obtido, será pré-processado e estruturado em forma de uma lista ordenada pelo horário de chegada de cada alarme.

4.3 - Base de Conhecimento

A base de conhecimento é constituída de duas partes :

- a **BASE DE DADOS ESTÁTICA**, onde se encontram todas as informações do sistema elétrico que não sofrem alterações durante a simulação, tal como a conexão entre os equipamentos (linhas de transmissão, transformadores, etc.) e os dispositivos de seccionamento (chaves, disjuntores).

b BASE DE DADOS DINÂMICA, onde se encontram todas as informações que sofrem modificações no decorrer da simulação, tais como estado de dispositivos e equipamentos, valores das grandezas violadas, novos fatos inferidos, além do conhecimento dos especialistas.

4.4 - Máquina de Inferência

O núcleo de um Sistema Especialista é sua Máquina de Inferência. A inferência básica do SETA é combinar dois ou mais alarmes resultando em um único alarme. Alarmes concluídos são acrescentados à base de conhecimento podendo posteriormente ser recombinaados com outros alarmes, originando um novo alarme.

A máquina de inferência do SETA faz deduções a partir de dois processos básicos:

a Encadeamento Progressivo ou FORWARD : parte-se do fato, e a estratégia de controle (interpretador de regras) busca as consequências do fato ocorrido. As condições (antecedentes) das regras são verificadas. Sendo satisfeitas, novos fatos são gerados e acrescentados à base de conhecimento.

b Encadeamento Regressivo ou BACKWARD : parte-se de uma hipótese, a meta a ser provada. Reduz-se a meta a um conjunto de sub-metas até se chegar a fatos conhecidos. Satisfeitos os fatos, a meta é acrescentada à base de conhecimento.

4.5 - Processador de Conclusões

O processador de conclusões cuida da formatação das mensagens concluídas, compatibilizando-as com a estrutura da base de conhecimento. É também o gerenciador da apresentação da tela de alarmes tratados. As principais características deste processador são :

a Alarmes combinados são eliminados da tela dando lugar às suas respectivas conclusões;

b Alarmes que não satisfizeram nenhuma regra são simplesmente apresentados tal qual foram recebidos.

4.6 - Interfaces Homem/Máquina

Um dos módulos de interface possibilita a ação do operador sobre os alarmes apresentados. Os seguintes recursos estão disponíveis:

a Distinção dos alarmes por categoria através de cores;

b Reconhecimento e eliminação dos alarmes;

c Paginação das telas de alarmes;

d Obtenção de explicações sobre as inferências executadas.

Uma outra interface, permite o acesso à base de conhecimento. O usuário pode acrescentar, eliminar ou inibir regras e fatos com o auxílio de um Engenheiro de Conhecimento.

A relação dos alarmes recebidos e tratados, bem como um relatório estatístico da simulação, pode ser obtido na tela do vídeo ou numa impressora.

5 - RESULTADOS OBTIDOS

Diversos testes foram realizados no sistema ao longo do desenvolvimento, nas três modalidades de simulação. Serão apresentados, a seguir, um caso de uma perturbação simples e a simulação de uma contingência real, ocorrida no segundo semestre de 1990 nas instalações da CEMIG. Os resultados obtidos no tratamento dos alarmes desta contingência foram bastante animadores.

5.1 - Perturbação simples

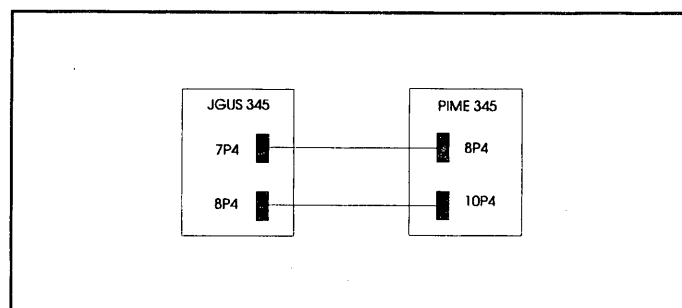


Figura 3 - Perturbação simples - primeiro caso

O primeiro caso corresponde à figura 3 acima.

As ocorrências são relativas à desenergização e posterior reenergização das duas linhas de transmissão que interligam as subestações de Jaguara 345kV (Usina) e Pimenta 345kV. Os quatro primeiros alarmes provocam a desenergização da linha:

```
19:28:42 JAGUARA-US D7P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
19:28:43 JAGUARA-US D8P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
19:29:02 PIMENTA D8P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
19:29:15 PIMENTA D10P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
```

Recebendo estas mensagens de alarme o sistema conclui que as linhas que interligam estas subestações se encontram desenergizadas. Apenas dois alarmes restarão após o tratamento:

```
19:29:15 JGUS-PIME1 FORA DE SERVICIO
19:29:15 JGUS-PIME2 FORA DE SERVICIO
```

Algum tempo depois são recebidos os alarmes de fechamento dos mesmos disjuntores:

```
19:31:56 JAGUARA-US D7P4 345 BKR FECHADO LOCAL
19:31:58 JAGUARA-US D8P4 345 BKR FECHADO LOCAL
19:33:27 PIMENTA D8P4 345 BKR FECHADO LOCAL
19:33:28 PIMENTA D10P4 345 BKR FECHADO LOCAL
```

Com a chegada destes novos alarmes, a máquina de inferência do sistema concluirá o retorno em serviço das duas linhas. Restarão na tela do operador apenas 2 alarmes.

```
19:33:28 JGUS-PIME AGORA EM SERVICIO
19:33:28 JGUS-PIME AGORA EM SERVICIO
```

No sistema de tratamento de alarmes existente, 12 alarmes persistiriam na tela do operador : 4 de abertura de disjuntor, 2 de linha fora de serviço, outros 4 de fechamento dos disjuntores e mais 2 alarmes indicando linha agora em serviço.

5.2 - Simulação de uma ocorrência real

Foram selecionados 56 alarmes da ocorrência, representados abaixo:

19:28:42 JAGUARA-SE D13U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:42 JAGUARA-SE D14U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:42 NEVES B500/01 KV=490.12 98.02% LIM INF=500
 19:28:42 NEVES B138/01 KV=127.50 99.61% LIM INF=128
 19:28:42 JGSE-OPR2 MW=1900.00 102.70% LIM SUP=1850
 19:28:45 NEVES D6U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:45 NEVES D7U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:45 JGSE-OPR2 MW=1950.00 105.40% LIM SUP=1850
 19:28:46 BARREIRO B138/01 KV=129.00 98.47% LIM INF=131
 19:28:46 BARREIRO B345/01 KV=339.00 99.27% LIM INF=341
 19:28:46 BARREIRO B345/01 KV=333.00 97.51% LIM INF=341
 19:28:54 JAGUARA-SE D9U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:54 JAGUARA-SE D10U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:54 JAGUARA-SE D10U4 500 BKR FECHADO LOCAL
 19:28:54 BARREIRO B138/01 KV=125.00 95.42% LIM INF=131
 19:28:54 NEVES B500/01 KV=480.50 96.10% LIM INF=500
 19:28:54 NEVES B138/01 KV=125.40 97.97% LIM INF=128
 19:28:54 TAQUARIL B345/01 KV=330.00 99.40 LIM INF=332
 19:28:54 TAQUARIL B345/02 KV=330.00 99.40 LIM INF=332
 19:28:57 OURO PRETO D3U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:57 OURO PRETO D3U4 500 BKR FECHADO LOCAL
 19:28:57 OURO PRETO D4U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:28:58 BARREIRO B345/01 AGORA DENTRO DOS LIMITES
 19:28:58 BARREIRO B138/01 KV=124.90 95.34% LIM INF=131
 19:28:58 NEVES B500/01 KV=485.70 97.14% LIM INF=500
 19:28:58 NEVES B138/01 KV=127.40 99.53% LIM INF=128
 19:28:58 TAQUARIL B345/01 AGORA DENTRO DOS LIMITES
 19:28:58 TAQUARIL B345/02 AGORA DENTRO DOS LIMITES
 19:29:06 TRES MARIAS B138/01 KV=128.30 98.31% LIM INF=130
 19:29:10 JAGUARA-SE D10U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:29:10 BARBACENA B138/01 KV=124.90 93.21% LIM INF=134
 19:29:10 BARREIRO B345/01 KV=340.00 99.56% LIM INF=341
 19:29:10 BARREIRO B138/01 KV=120.10 91.68% LIM INF=131
 19:29:10 NEVES B500/01 KV=479.60 95.92% LIM INF=500
 19:29:10 NEVES B138/01 KV=125.00 97.66% LIM INF=128
 19:29:10 TAQUARIL B345/01 KV=328.00 98.80% LIM INF=332
 19:29:10 TAQUARIL B345/02 KV=326.00 98.19% LIM INF=332
 19:29:10 OURO PRETO B500/01 KV=475.30 97.00% LIM INF=490
 19:29:10 OURO PRETO B500/01 KV=475.30 97.00% LIM INF=490
 19:29:10 JGSE-OPR2 MW=2500.00 135.13% LIM SUP=1850
 19:29:13 OURO PRETO D3U4 500 BKR DESARMADO LOCAL
 19:29:13 LAFAIETE B345/BP KV=318.00 99.37% LIM INF=320
 19:29:13 LAFAIETE B138/BP KV=126.00 91.30% LIM INF=138
 19:29:14 BARREIRO B138/01 KV=116.30 88.78% LIM INF=131
 19:29:14 NEVES B500/01 KV=472.60 94.52% LIM INF=500
 19:29:14 NEVES B138/01 KV=120.24 93.94% LIM INF=128
 19:29:14 PIMENTA B345/01 KV=322.00 97.58% LIM INF=330
 19:29:14 PIMENTA B345/02 KV=322.00 97.58% LIM INF=330
 19:29:14 TAQUARIL B345/01 KV=322.00 96.99% LIM INF=332
 19:29:14 TAQUARIL B345/02 KV=322.00 96.99% LIM INF=332
 19:29:14 JUIZ DE FORA B345/01 KV=319.00 98.15% LIM INF=325
 19:29:14 BARBACENA B345/01 KV=319.20 99.75% LIM INF=320
 19:29:16 JAGUARA-US D7P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
 19:29:16 JAGUARA-US D8P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
 19:29:17 PIMENTA D8P4 345 BKR DESARMADO LOCAL
 19:29:17 PIMENTA D10P4 345 BKR DESARMADO LOCAL

Diagramas simplificados das instalações envolvidas na ocorrência são apresentados na figura 4. É apresentada, a seguir, uma descrição sucinta da operação do sistema SETA na filtragem destes alarmes. O primeiro grupo de alarmes foi recebido às 19:28:42. Os disjuntores D13U4 e D14U4 de JAGUARA 500

abriram. Um terminal da linha JAGUARA-NEVES ficou isolado. Os alarmes de queda de tensão nas subestações NEVES 500 kv e 138 kv foram consequência desta perda. Quando ocorre um evento do tipo queda de tensão em diferentes níveis de uma mesma instalação, o sistema SETA apresenta apenas o alarme referente à instalação de menor nível de

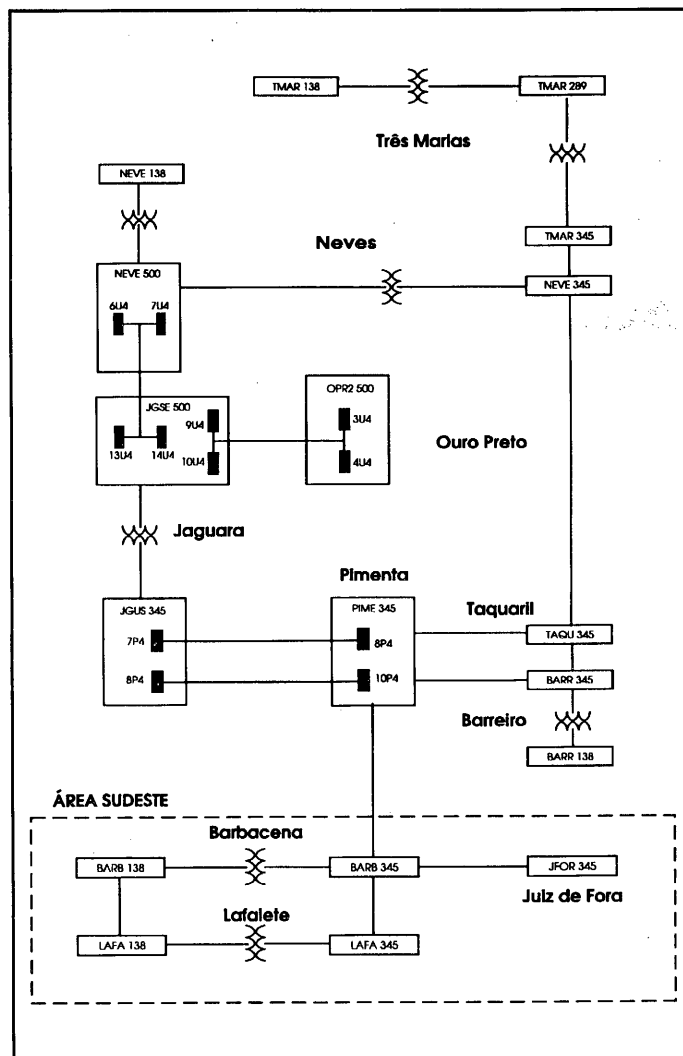


Figura 4 - Diagrama simplificado das instalações

tensão. Assim, destes últimos dois alarmes, apenas aquele considerado mais importante permanece, ou seja, o alarme relativo à subestação de 138 kv. Ocorreu também uma sobrecarga na linha JAGUARA-OURO PRETO, sendo emitido um alarme.

Às 19:28:45 os disjuntores D6U4 e D7U4 de NEVES 500 kv abrem isolando definitivamente a linha. A combinação destes alarmes com os alarmes dos disjuntores do terminal de Jaguara dá origem a um novo alarme do tipo "linha de transmissão fora de serviço". O carregamento da linha JAGUARA-OURO PRETO apresenta novas variações. É bastante comum a ocorrência de diversos alarmes relativos a um único equipamento que apresenta variações recorrentes. O sistema apresenta apenas o alarme mais recente do equipamento, mantendo o operador sempre atualizado e evitando redundâncias indesejáveis.

Às 19:28:46 as subestações BARREIRO apresentam queda de tensão. Apenas o alarme da subestação de 138 kv é apresenta-

Às 19:28:54 abrem os disjuntores D9U4 e D10U4 da linha JAGUARA-OURO PRETO. O disjuntor D10U4 fecha-se no mesmo instante. O alarme do disjuntor D10U4 não é apresentado. Uma nova queda de tensão é verificada na subestação BARREIRO 138 kv. Este alarme substitui o anterior. Nas subestações NEVES ocorrem novas quedas de tensão e o alarme da subestação de 138 kv substitui o anterior. Em TAQUARIL 345 kv, os barramentos 1 e 2 apresentam queda de tensão. Somente o alarme mais recente é mantido.

Às 19:28:57 o disjuntor D3U4 de OURO PRETO 500 abre e fecha no mesmo instante. O disjuntor D4U4 abre.

Às 19:28:58 o nível de tensão da subestação BARREIRO 345 kv retorna ao seu limite operativo seguro, entretanto a subestação de 138 kv ainda se encontra fora dos limites. O alarme da subestação de 138 kv atualiza o anterior. O mesmo ocorre nas subestações NEVES. A subestação TAQUARIL retorna ao seu limite operativo seguro. O alarme de distúrbio de tensão é eliminado em favor de um alarme do tipo "agora dentro dos limites".

Às 19:29:06 um alarme de violação de tensão na subestação de TRÊS MARIAS 138 kv é emitido.

Às 19:29:10 o disjuntor D10U4 de JAGUARA 500 kv abre, isolando um dos terminais da linha JAGUARA-OURO PRETO. Uma queda de tensão é observada em BARBACENA. Alterações de tensão nas subestações BARREIRO, NEVES e TAQUARIL são verificadas. Os alarmes mais recentes são mantidos. Em OURO PRETO também é verificada uma queda de tensão em alarme referente a dois barramentos acoplados eletricamente. Apenas um deles permanece. Novamente é recebido um alarme de violação de carregamento na linha JAGUARA-OURO PRETO.

Às 19:29:13 o disjuntor D3U4 de OURO PRETO 500 kv abre, isolando definitivamente a linha JAGUARA-OURO PRETO. O alarme de violação de carregamento é eliminado em favor do alarme "linha de transmissão fora de serviço". É constatada uma queda de tensão nos barramentos das subestações LA-FAIETE. Apenas o alarme da subestação de 138 kv é apresentado.

Às 19:29:14 a tensão da subestação BARREIRO cai novamente. São observadas nove quedas de tensão em NEVES, PIMENTA, TAQUARIL, JUIZ DE FORA e BARBACENA. Neste momento, todas as subestações da área SUDESTE (figura 4) apresentam queda de tensão. A combinação destes alarmes resulta num novo alarme do tipo "tensão baixa generalizada", substituindo os alarmes das subestações da área.

Às 19:29:16 os disjuntores D7P4 e D8P4 da usina de JAGUARA abrem isolando parcialmente a conexão com PIMENTA.

Finalmente, às 19:28:54 abrem os disjuntores do outro lado da linha provocando o isolamento entre as subestações de PIMENTA e JAGUARA 345 kv. Os alarmes do tipo "linha de transmissão fora de serviço" substituem os alarmes de dispositivos abertos.

O intervalo entre o primeiro e o último alarme recebido é de apenas 35 segundos. Após o tratamento pelo sistema, restaram os seguintes alarmes:

19:28:45 JGSE-NEVE FORA DE SERVICIO
19:29:06 TRÊS MARIAS B138/01 KV=128.30 98.31% LIM INF=131
19:29:10 OURO PRETO B500/01 KV=475.30 97.00% LIM INF=490
19:29:13 JGSE-OPR2 FORA DE SERVICIO
19:29:14 BARREIRO B138/01 KV=116.30 88.78% LIM INF=131
19:29:14 NEVES B138/01 KV=120.24 93.94% LIM INF=128
19:29:14 PIMENTA B345/02 KV=322.00 97.58% LIM INF=330
19:29:14 TAQUARIL B345/02 KV=322.00 96.99% LIM INF=332
19:29:14 TENSÃO BAIXA ÁREA SUDESTE
19:29:17 JGUS-PIME1 FORA DE SERVICIO
19:29:17 JGUS-PIME2 FORA DE SERVICIO

O resultado da simulação é mostrado no relatório estatístico abaixo:

Alarmes recebidos

- Número de alarmes de topologia: 16
- Número de alarmes de violação de grandezas: 40
- Total de alarmes: 56

Alarmes tratados

- Número de alarmes de topologia: 4
- Número de alarmes de violação de grandezas: 7
- Total de alarmes: 11

Resultados gerais

- Número de alarmes eliminados: 45
- Percentual de alarmes eliminados: 80%

6 - VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA SETA

O sistema especialista desenvolvido nos parece adequado para aplicações "on line". O módulo executável pode ser utilizado num micro-computador, exigindo-se um monitor colorido para distinção das diversas categorias de alarme. Podem ser destacadas as seguintes contribuições que a utilização do sistema SETA poderá trazer atuando em conjunto com o sistema convencional de processamento de alarmes: mensagens mais concisas e claras; maior eficiência operacional; maior agilidade nos treinamentos; melhoria constante do sistema (o sistema especialista pode ser continuamente testado e aperfeiçoado através da participação dos operadores) e diminuição do estresse operativo.

O sistema apresenta as seguintes limitações: requer grande memória computacional; possível incompatibilidade com os equipamentos computacionais da empresa de energia elétrica e portabilidade não imediata.

7 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O desenvolvimento deste trabalho representa mais um passo para a adoção da tecnologia de Sistemas Especialistas em empresas nacionais de energia, em busca de uma maior eficiência operativa.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. O principal objetivo foi alcançado: a sensibilização dos usuários quanto à importância dos benefícios que podem ser obtidos com a utilização de um Sistema Especialista. Este sistema revelou-se uma importante ferramenta no aprendizado e treinamento dos operadores. Com o desenvolvimento e a utilização deste sistema o conhecimento dos especialistas fica retido, garantindo

assim que a experiência destes profissionais possa ser transmitida para as novas gerações.

No presente momento há algumas dezenas de Sistemas Especialistas operando em centros de controle espalhados pelo mundo inteiro. A maioria deles ainda se encontra separada dos sistemas de supervisão principal (SCADA ou EMS), existindo apenas o enlace de dados necessário com o Sistema Supervisório. Os estudos realizados pelas concessionárias de energia sobre uma nova concepção de Centros de Controle estão convergindo para a adoção de uma arquitetura aberta onde o Sistema Especialista é executado num PC que se comunica em rede com a Base de Dados de um Sistema SCADA.

Uma continuação natural deste trabalho é a integração do protótipo com o Sistema de Controle. Uma linha de pesquisa bastante promissora é o estudo da incorporação de redes neurais artificiais ao processamento inteligente de alarmes; espera-se uma redução importante no tamanho da Base de Conhecimento devido à capacidade de generalização destas redes. Estas duas atividades estão sendo exploradas no momento.

AGRADECIMENTO: os autores são bastante reconhecidos pelo trabalho executado pelo aluno José Eugênio Assis Gonçalves no desenvolvimento das interfaces do sistema SETA. Eles agradecem também o auxílio recebido da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), processo TEC 858/90 e da CAPES e CNPq, pelas bolsas de Mestrado e Iniciação Científica concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bijoch, R.W., S.H. Harris, & T.L. Volkmann, (1989). "Intelligent Alarm Processor at Northern States Power". *Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems*. Seattle - USA, pp 79-83.
- Bratko, I., (1990). *Prolog Programming for Artificial Intelligence*. Addison Wesley.
- Christie, R.D., (1991). "Benchmarking Expert Systems Tools with a Message Screening Application". *Third Symposium on Expert Systems Application To Power System*. Tokyo - JAPAN, 7p.
- Hayes-Roth, F., D.B. Lenat, & D.A. Waterman, (1986). *Building Expert Systems* Addison Wesley.
- Heydeman, J. & R.A. Harrewijn, (1989). "Knowledge Based System for Alarm Reduction". *Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems*. Seattle - USA, pp 96-101.
- Nilsson, N.J., (1982). *Principles of Artificial Intelligence*. Tioga Publishing.
- Prince, W.R., B.F. Wollenberg, & D.B. Bertagnolli, (1989). "Survey on Excessive Alarms". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, N° 3, pp 950-956.

Queiroz, J.C.B., (1992). *Sistema Especialista para Tratamento de Alarmes em Centros de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos*. Tese de Mestrado, UFMG, 125p.

Queiroz, J.C.B., E.O. Araújo, D.G. Ferreira, & H.M. Masci, (1992). "Sistema Especialista para Tratamento de Alarmes em Centros de Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos". *1º Simpósio sobre Automação de Sistemas Elétricos - Modernidade na Operação*. Campinas - SP.

Wollenberg, B.F., (1986). "Feasibility Study for an Energy Management System Intelligent Alarm Processor". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 1, N° 2, pp 241-247.

Zhang, Z.Z., G.S. Hope, & O.P. Malik, (1989). "Expert Systems in Electric Power Systems - A Bibliographical Survey". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, N° 4, pp 1355-1362.