



XVI SNPTEE
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

GRUPO IX
OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

SISTEMAS INTELIGENTES PARA APOIO AO DESLIGAMENTO PROGRAMADO EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Alberto Arkader Kopiler (*)
CEPEL

Viviane Morelli Rossi
VMR Pesquisa e Desenvolvimento Ltda. ME

Eduardo Barbosa Evangelista
P4E

Carlos Alberto Rodrigues Alves
ONS

RESUMO

O objetivo deste artigo é apresentar técnicas baseadas em inteligência artificial para dar suporte à tomada de decisão do operador envolvido no processo de análise de desligamentos programados. Para tanto é apresentado um sistema híbrido que auxilia na aceitação, adiamento ou cancelamento de requisições de manutenção programadas em equipamentos que compõem a malha principal do sistema elétrico brasileiro, levando em consideração aspectos elétricos e econômicos.

PALAVRAS-CHAVE: Desligamento Programado, Inteligência Artificial, Sistemas Híbridos, Sistema Especialista.

1.0 – INTRODUÇÃO

O desligamento programado se caracteriza pelo recebimento periódico de solicitações de desligamento de equipamentos elétricos de alta tensão (linhas de transmissão, transformadores, etc) para manutenção. Estas solicitações são provenientes de diversas empresas de energia elétrica participantes do Sistema Interligado Brasileiro. Atualmente, como o Sistema está operando quase no limite de sua capacidade, a tomada de decisão de aprovar ou não solicitações de desligamento que ocorrem no mesmo período tornou-se crítica. Equívocos em decisões sobre desligamentos, ou mesmo em suas medidas preventivas, podem trazer severas conseqüências para o sistema.

A necessidade de aquisição da experiência dos especialistas em desligamento programado para dar suporte à decisão, conduziu à utilização de técnicas de

inteligência artificial que permitam adquirir e utilizar esse conhecimento.

A seguir são apresentadas as principais técnicas de inteligência artificial e suas principais aplicações para sistemas elétricos de potência.

2.0 – TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
APLICADAS A SISTEMAS DE POTÊNCIA

Nesta última década houve um aumento na utilização de técnicas de inteligência artificial aplicadas a sistemas elétricos de potência, como redes neurais artificiais, sistemas especialistas, lógica nebulosa (*fuzzy logic*), algoritmos genéticos, agentes, etc; como pode ser comprovado nos congressos mais recentes do ISAP (“Intelligent Systems Applications to Power Systems”) (1).

Essas técnicas são aplicadas a sistemas elétricos de potência principalmente para:

- 1) Previsão e estimativa
- 2) Suporte à decisão e diagnóstico
- 3) Processamento de alarmes
- 4) Controle e estabilidade
- 5) Identificação de falhas
- 6) Identificação de sistemas
- 7) Planejamento operacional
- 8) Qualidade e conservação de energia
- 9) Proteção
- 10) Recomposição de sistemas

Nos subitens a seguir são apresentadas objetivamente as principais técnicas de inteligência artificial e as aplicações no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

2.1 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais são inspiradas na estrutura e operação do cérebro humano sendo utilizadas principalmente no reconhecimento de padrões (2). Têm como características necessitar de treinamento, ser de fácil implementação e de não explicar os resultados obtidos. São aplicáveis a sistemas que apresentem dados com ruído ou não-lineares e que não possuam especialistas ou regras de fácil formulação. São aplicadas a sistemas elétricos de potência principalmente para previsão, estimativa, otimização e planejamento.

2.2 Lógica nebulosa

A lógica nebulosa é inspirada no raciocínio humano aproximado, ou seja, na capacidade do homem tirar conclusões baseadas em informações vagas, sendo utilizada principalmente em controle (3). Tem como características necessitar de um especialista para formular as regras necessárias, explicar os resultados obtidos e ser capaz de tomar decisões em um ambiente de incerteza e imprecisão. É aplicável a sistemas que apresentem dados imprecisos ou inexatos e que possuam especialistas ou regras de fácil formulação. É aplicada a sistemas elétricos de potência principalmente para controle e processo de tomada de decisão.

2.3 Sistemas especialistas

Os sistemas especialistas são inspirados na inferência humana, ou seja, na capacidade do homem tirar conclusões baseadas em informações precisas (base de conhecimento), sendo utilizados principalmente no processo de tomada de decisão (2). Têm como características necessitar de um especialista para formular as regras precisamente e explicar completamente todo o processo da solução, inclusive os resultados obtidos. É aplicável a sistemas que apresentem dados precisos e que possuam especialistas para formular as regras necessárias. É aplicada a sistemas elétricos de potência principalmente para diagnóstico e suporte à tomada de decisão.

2.4 Algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos são inspirados no mecanismo de evolução natural e nos princípios da genética sendo utilizados principalmente em otimização (3). Têm como características o paralelismo, ser de fácil

implementação, mas de difícil representação para alguns problemas. É aplicável a sistemas que necessitem de otimização de difícil solução ou possuam vasto espaço de busca. É aplicada a sistemas elétricos de potência principalmente para otimização.

2.5 Agentes

Os agentes são inspirados no comportamento humano em sociedade (autonomia, delegação, habilidade social, iniciativa e reação). Os sistemas de agentes buscam solucionar problemas complexos através do seu particionamento em problemas menores, que possam ser tratados por elementos de *software* mais simples e especializados, autônomos e capazes de cooperar: os agentes de *software*. Em sistemas de potência, podem ser aplicados em controle desassistido ou em sistemas de alta complexidade onde há necessidade forte de interação, como os novos centros de controle.

2.6 Aplicações no CEPEL

No CEPEL, os projetos que utilizam técnicas de inteligência artificial são os seguintes: 1) recomposição de sistemas (RECOMP), 2) previsão de carga (PREVCAR, CAHORA), 3) estimador de carga de arrancamento de fundações, 4) diagnóstico em equipamentos elétricos, 5) suporte à decisão no desligamento programado (DESPRO), 6) automação de salas de controle, 7) diagnóstico de falhas em hidrogeradores (DiaHGer), 8) processamento de alarmes, 9) Identificação de tipos específicos de defeitos em equipamentos de alta tensão pela medição de descargas parciais e 10) Otimização de desligamentos programados.

A seguir esses projetos são classificados por estágio de desenvolvimento, técnica de inteligência artificial utilizada e por aplicação.

2.6.1 Classificação por estágio de desenvolvimento

- i) Estudos: 4, 6, 9 e 10
- ii) Projetos: 1,2,3,5,7 e 8

2.6.2 Classificação por técnica de inteligência artificial

- i) Redes neurais: 2,3,4,8 e 9
- ii) Lógica nebulosa: 4 e 7
- iii) Algoritmos genéticos: 10
- iv) Sistemas especialistas: 1,5 e 7
- v) Agentes: 6

2.6.3 Classificação por aplicação

- i) Planejamento operacional: 10
- ii) Suporte à decisão e diagnóstico: 4,5 e 7
- iii) Previsão e estimativa: 2 e 3
- iv) Identificação de falhas: 9
- v) Processamento de alarmes: 8
- vi) Controle e estabilidade: 6
- vii) Recomposição de sistemas: 1

2.6.4 Conclusão

Como pôde ser visto, existem diversas técnicas de inteligência artificial. Apesar de suas aplicações normalmente serem específicas, muitas vezes pode-se obter um resultado mais satisfatório através da utilização de uma combinação dessas técnicas, como, por exemplo, neuro-fuzzy.

3.0 – PROJETO DESPRO

O CEPEL está desenvolvendo para o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) um sistema para suporte a análise de desligamento de equipamentos. Esse sistema evoluirá para um sistema híbrido baseado em regras para um sistema especialista e ferramentas de análise de redes (fluxos de potência convencional e ótimo, análise composta de confiabilidade, estabilidade eletromecânica e estabilidade transitória através de Funções de Energia), conforme pode ser visto na figura 1.

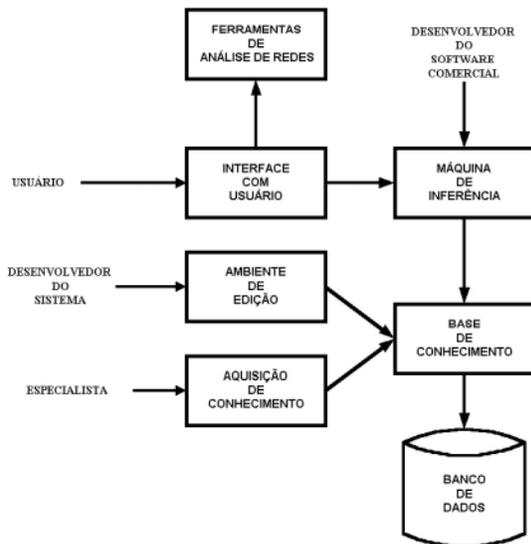


Figura 1 - Sistema híbrido

O objetivo é integrar essas diversas ferramentas a um banco de dados e a uma base de conhecimento para auxiliar o operador na tomada de decisão, aumentando, conseqüentemente, a produtividade e segurança dos estudos envolvidos.

Este sistema é chamado DESPRO – Sistema Especialista para Análise do Desligamento Programado (4).

O sistema é multiusuário, permitindo que vários usuários acessem simultaneamente a mesma base de dados. A arquitetura do sistema é cliente-servidor.

A seguir é descrito o estágio atual do desenvolvimento do projeto e a proposta para o futuro, levando-se em consideração o que a reestruturação do setor elétrico pode trazer em termos de mudança de paradigmas.

3.1 Estágio atual

Os módulos básicos já desenvolvidos e em operação são apresentados na figura 2.

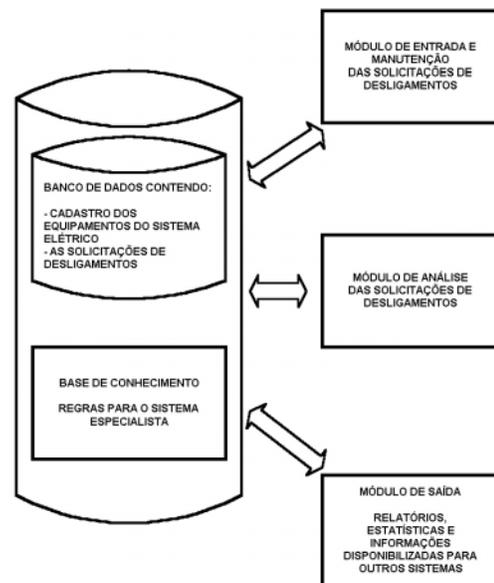


Figura 2 – Esquema básico dos módulos do Despro

O Módulo de Entrada e Manutenção das Solicitações de Desligamento tem como objetivo auxiliar os usuários no recebimento, registro, controle e divulgação dos desligamentos programados e suas respectivas recomendações. Chamamos de recomendações tanto as medidas preventivas, que podem ou devem ser tomadas antecipadamente para manter o Sistema Elétrico íntegro após ser efetuado um desligamento, quanto as corretivas, que podem ou devem ser tomadas em caso de instabilidade ou emergência no Sistema. Muitas vezes essas medidas acabam afetando outros equipamentos do sistema.

As Solicitações de Desligamento registram os equipamentos que terão a sua indisponibilidade analisada pelo Despro, indicando o equipamento pelo nome e por sua localização na rede elétrica. Assim, todos os usuários do sistema conseguem visualizar e

estudar os desligamentos cadastrados no Banco de Dados.

Com a entrada destas solicitações de desligamento no sistema, o programa Despro as disponibiliza para serem utilizadas no Módulo de Análise. O processo de tomada de decisão é considerado complexo, uma vez que os operadores se defrontam com várias requisições simultâneas, buscando a pior contingência e identificando os possíveis equipamentos afetados em cascata, de forma a determinar os controles preventivos a serem atuados sobre o sistema elétrico. Uma decisão errada tomada pelo operador pode causar conseqüências severas ou mesmo grandes emergências.

Para auxiliar o operador e reduzir a margem de erro, este módulo utiliza técnicas de inteligência artificial para atingir esse objetivo (métodos de análise baseados em regras heurísticas). Ele consiste de um Sistema Especialista que é capaz de analisar um conjunto de solicitações de desligamentos, processar o “raciocínio” baseado em regras, e acessar o banco de dados para representar o sistema elétrico degradado. Esta base de dados modificada serve como entrada para programas de análise de rede sendo gerado um relatório de saída, sugerindo o caminho a ser tomado e apresentando os casos estudados. Mas a decisão final é sempre tomada pelo operador.

No Módulo de Saída, o programa Despro fornece ao operador relatórios que auxiliam no seu dia-a-dia, por exemplo estatísticas das solicitações de desligamento por empresa e quinzena, relatório do programa diário de transmissão, entre outros. As informações armazenadas no sistema permitem que por solicitação do operador, o programa gere lotes de desligamentos para patamares de meia em meia hora e de hora em hora para um horizonte de até 14 dias para simulações na Programação Diária do ONS.

3.2 Sistema proposto

O diagrama em blocos do sistema proposto é apresentado na figura 3.

Quando em operação, o sistema deverá classificar um conjunto de solicitações de desligamento por dia e cenário e disparar a inferência do sistema especialista. Em seguida, caso o equipamento em estudo possua alguma recomendação associada, o sistema especialista deverá sugerir uma série de operações sobre os dados do Sistema Elétrico, tais como retirada e inserção de equipamentos, alteração da compensação reativa, controle da geração de potência ativa ou mesmo corte de carga. Essas operações deverão ser gravadas em um novo arquivo de dados. Esta nova base de dados, sob a forma de cartões ANAREDE (programa de fluxo de potência

do CEPTEL), será analisada pelo usuário que poderá reajustar o caso via interface gráfica, caso julgue necessário. Este reajuste será feito de acordo com as sugestões dadas pelo sistema especialista na forma de instruções de operação, recomendações operativas e limites operativos, assim como pela experiência do usuário.

O objetivo é investigar a viabilidade de um conjunto de manutenções programadas para o mesmo horário, procurando a pior, ou piores emergências derivadas. O sistema proposto poderá, então, disparar o programa de análise de sistema elétrico mais conveniente, o qual receberá como entrada o novo arquivo de dados do sistema degradado.

Após a execução, por exemplo, do programa ANAREDE, o sistema especialista será realimentado pelas violações em equipamentos que possuam regras associadas.

A constante monitoração dos equipamentos críticos do Sistema Elétrico Brasileiro poderá aumentar a segurança dos estudos envolvidos. Os equipamentos cujas violações passariam despercebidas por não estarem aparentemente relacionados com os estudos, mas devido às alterações decorrentes de outros desligamentos apresentem um comportamento inesperado, não passarão despercebidos, pois a realimentação disparará a recomendação associada alertando o usuário.

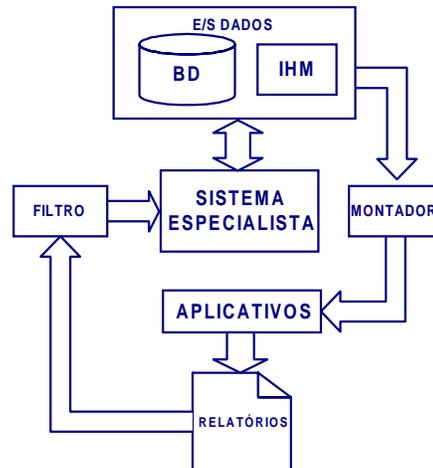


Figura 3 – Diagrama em blocos do sistema proposto

A seguir, são apresentados alguns módulos que estão em desenvolvimento para atender o sistema proposto:

→ DESPRO_ER – O Editor de Regras (ER) tem como uma de suas principais funções permitir que seus

usuários possam reprogramar o sistema especialista (SE) para novas recomendações e regras de otimização. Estas tarefas serão executadas por meio de uma interface gráfica de fácil compreensão, dispensando o usuário de possuir conhecimentos específicos de programação deste ambiente computacional e de seu acesso a sistemas gerenciadores de banco de dados

→ DESPRO_Análise – É o módulo responsável pela análise dos desligamentos. Permite que o usuário comande o SE e as ferramentas de análise de redes elétricas. O usuário poderá fazer sua análise com o auxílio de recomendações sugeridas pelo SE e a recuperação automática de limites operativos dos equipamentos envolvidos a partir do banco de dados.

→ DESPRO_FILTRO – Tem como objetivo realimentar o sistema especialista. Varre os relatórios gerados pelos aplicativos de análise de rede a procura de determinadas violações operativas que venham a disparar novas regras associadas.

As alterações no sistema elétrico decorrentes do planejamento dos desligamentos podem provocar mudanças imprevistas em seu comportamento com possíveis novas situações de emergência para os operadores. Neste contexto, não há, à rigor, um critério explícito para avaliar de forma mais ampla a qualidade dos resultados de uma programação de desligamentos. Sendo assim, há a necessidade de integrar ao sistema especialista, cujo objetivo é aquisitar e recuperar o conhecimento prático dos engenheiros para futuros estudos, o ordenamento de índices de severidade das possíveis emergências mais críticas através de análises de contingência automática. Espera-se que a aplicação destes índices permita o desenvolvimento de critérios de avaliação acessíveis a todos os agentes envolvidos e o desenvolvimento de um programa de otimização que utilize estes índices elétricos para a montagem de um cronograma dos desligamentos quase-ótimo face às restrições de ordem política e econômica, auxiliando, assim, a análise e o planejamento executados pelos engenheiros envolvidos.

Os métodos de otimização clássicos como programação linear, programação inteira, programação dinâmica, e programação multi-objetivo foram usados inicialmente por vários autores em pesquisas sobre a programação de desligamentos. A maioria destes métodos tem como objetivo determinar o horário ótimo de manutenção havendo, no entanto, apresentado eficiência quando aplicados a pequenos sistemas de potência. Formalmente, pode-se caracterizar o desligamento programado brasileiro não somente pela

sua expressiva dimensão, como também pela sua complexidade de procedimentos. Portanto, regras e heurísticas devem ser usadas em conjunto com os métodos de otimização para resolver o problema de programação da manutenção, sendo que são úteis também no tratamento de um grande número de restrições subjetivas que são de difícil formulação.

Refletindo o fato de que o problema de planejamento de desligamentos de grande porte fica exposto a explosões combinatórias e que as situações envolvem particularidades de cada sistema, há poucos trabalhos de pesquisa nesta área que possam ser aplicados ao Sistema Brasileiro. Certamente, há na literatura inúmeras referências sobre programação da manutenção de unidades térmicas, mas este problema tem sido formulado de modo completamente diferente se comparado ao planejamento dos trabalhos de desligamentos realizados no ONS, porque tipicamente a carga é totalizada e não são levadas em consideração as configurações de sistema. Deve-se ressaltar que a não consideração do sistema de transmissão neste tipo de otimização, sobretudo no horizonte de curto-prazo da operação, pode resultar em programas de desligamentos não adequados à realidade operativa do sistema brasileiro.

Com o objetivo de evitar explosões combinatórias e tratar as restrições de natureza subjetiva presentes no desligamento programado brasileiro, uma abordagem híbrida baseada em heurística e algoritmos genéticos terá sua viabilidade estudada. Um estudo de viabilidade com algoritmos genéticos justifica-se, pois as técnicas de computação evolucionária apresentam um ganho de flexibilidade e adaptabilidade ao problema, em combinação com um desempenho robusto (embora essas técnicas dependam de ajustes finos conforme o problema) e características de busca global. Por não trabalharem com uma única solução apenas, mas com uma população de soluções candidatas, ao final da convergência, os algoritmos genéticos (AG) fornecem um leque de soluções, sendo algumas praticamente iguais e outras muito parecidas com a melhor solução encontrada até então. Isso é uma importante fonte de flexibilidade em problemas reais. Essa flexibilidade é compatível com o novo ambiente descentralizado do setor elétrico, pois fornece um conjunto de opções de cronograma muito parecidas (critérios de natureza política e econômica podem ser julgados pelo usuário como restrições aplicadas subjetivamente), ao invés de uma única solução ótima.

Numa situação como essa, o agente regulador estaria apto a escolher de forma transparente entre as soluções alternativas, levando em consideração os benefícios dos agentes e aspectos estratégicos *vis-à-vis* questões de curto prazo. Por outro lado, um agente individual

operando em um ambiente de mercado de energia competitivo face às inúmeras incertezas existentes, não apenas técnicas mas também econômicas e políticas, seria beneficiado ao poder negociar as alternativas similares que não afetassem a segurança do sistema interligado brasileiro.

Essa flexibilidade possibilita o tratamento de uma forma mais segura e transparente de aspectos subjetivos do problema tais como preocupações sociais, econômicas e políticas entre outras, sem abrir mão da otimização de índices elétricos de segurança. É interessante frisar que o cronograma resultante alterará a configuração da topologia da malha principal que será submetida à otimização eletro-energética no pré-despacho. Portanto, também deve ser feito um estudo sobre a viabilidade da determinação de índices e regras que possam ter algum impacto no Mercado Atacadista de Energia (MAE).

4.0 – CONCLUSÕES

Para garantir o sucesso do projeto é importante agregar o conhecimento dos especialistas e operadores em todas as etapas do projeto (interface homem-máquina, relatórios de saída, etc) e não apenas na aquisição de conhecimento para o sistema especialista.

Em um ambiente multiusuário, o armazenamento de informações em um banco de dados na forma de regras, limites operativos e contingências críticas não cria apenas novas possibilidades de automação, mas também aumenta a segurança no gerenciamento e otimiza o trabalho disperso e repetido de prospecção de dados, disponibilizando-os automaticamente para todos os usuários para a realização de novos estudos e a confecção de novas regras.

A possibilidade de expansão deste procedimento ao longo da cadeia de planejamento, oferecendo a opção de edição de regras, além da forma tradicional de documentação de estudos, deve ser observada.

Como futuro trabalho, além da continuidade da linha de pesquisa atual, é proposta a integração de métodos de otimização (algoritmos genéticos) para atender às novas necessidades decorrentes da reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro. Espera-se que essas novas metodologias possibilitem uma participação eficiente e segura do processo de Desligamento Programado em um ambiente de competição.

5.0 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos a colaboração de Jayme Guimarães, José Augusto Gomes, Gílson Mussi e Kazuo Haraguchi do ONS; e a todos os pesquisadores do CEPEL que contribuíram com esse artigo, em especial a Avelino Placca e Gilberto Pires de Azevedo.

6.0 – BIBLIOGRAFIA

- (1) SILVA, A.P.A, “Cenário das Ferramentas de Inteligência Artificial e das Aplicações Práticas a Sistemas de Potência”, Workshop: Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas a Sistemas de Potência, Furnas Centrais Elétricas, agosto de 2000.
- (2) FIGUEIREDO, K., OLIVEIRA, F., PACHECO, M. A., VELLASCO, M., “ Intelligent Solutions to Energy Conservation Problems”, Workshop: Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas a Sistemas de Potência, Furnas, agosto de 2000.
- (3) PACHECO, M. A., “Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações”, Workshop: Técnicas de Inteligência Artificial aplicadas a Sistemas de Potência, Furnas, agosto de 2000.
- (4) PINTO, H. B., e outros, “Automatic Contingency Analysis Integration to an Expert System in Scheduled Outage”, VII SEPOPE, maio de 2000, Curitiba, Paraná.
- (5) PASAYE, K., CHIGNELL, M., KHOSHAFIAN, S., WONG, H., “Intelligent Databases”, Wiley, 1989.