

## FERRAMENTA INTELIGENTE HÍBRIDA PARA LOCALIZAÇÃO DE COMPONENTE DEFEITOSO EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ALEXTIAN BATHOLOMEU LIBERATO\*, EDWIN BENITO MITACC MEZA†

\**Universidade Candido Mendes - UCAM  
Campos dos Goytacazes, RJ*

†*Universidade Federal Fluminense - UFF  
Rio das Ostras, RJ*

Emails: [abliberato@gmail.com](mailto:abliberato@gmail.com), [emitacc@ic.uff.br](mailto:emitacc@ic.uff.br)

**Abstract**— This article proposes the use of a hybrid model based on Artificial Neural Network and expert systems for the processing of events sent by the control system and acquisition of data, after the occurrence of a disturbance inside of an electric power substation. This answer will aid to the operator in the identification of the(s) component(s) defective(s) inside of the substation.

**Keywords**— Artificial Neural Network, Expert Systems, Protection systems of substation.

**Resumo**— Este artigo propõe a utilização de um modelo híbrido baseado em redes neurais artificiais e sistemas especialistas para o processamento de eventos enviados pelo sistema de controle e aquisição de dados, após a ocorrência de um distúrbio dentro de uma subestação de energia elétrica. Esta resposta irá auxiliar ao operador na identificação do(s) componente(s) defeituoso(s) dentro da subestação.

**Palavras-chave**— Rede Neural Artificial, Sistemas Especialista, Sistemas de proteção em subestações.

### 1 Introdução

Uma das necessidades comuns às concessionárias elétricas, é ter centros operativos capazes de atender a demanda dos clientes com o máximo de continuidade e qualidade, de forma economicamente justificada, respeitando restrições elétricas e ambientais. Assim, para suprir adequadamente esta necessidade, as subestações têm sido um elemento chave.

(McDonald, 2003) explica que uma subestação tem a função de isolar os sistemas com diferentes níveis de tensão, transformar e regular a energia elétrica em níveis adequados de tensão de transmissão e de distribuição. Uma subestação pode estar associada a uma usina geradora de energia elétrica ou pode atuar no controle direto do fluxo de potência na rede. Assim, para cumprir com esta tarefa as subestações contam com diversos componentes como: disjuntores de alta e média tensão, seccionadores, barramentos, transformadores de potência, reatores, capacitores, alimentadores e sistemas de proteção.

Um sistema de proteção dentro de uma subestação desempenha um papel fundamental do ponto de vista sistêmico, uma vez que permite que o sistema permaneça estável em condições adversas minimizando as conseqüências econômicas sobre o patrimônio da empresa distribuidora e influenciando nos índices de qualidade do fornecimento de energia aos clientes.

Na ocorrência de um defeito, os operadores devem tirar conclusões e tomar decisões a partir de um grande conjunto de eventos gerados pelos dispositivos de proteção, o que pode levar um tempo

demasiadamente grande. No primeiro segundo de um grande distúrbio o número de mensagens recebidas freqüentemente excede 15 a 20 mensagens. Testes mostraram que o ser humano tem capacidade de interpretar corretamente não mais do que 2 a 3 mensagens por segundo. Além do grande volume de informações a serem processadas, outros problemas tais como falhas no sistema de proteção e comunicação, bem como a existência de dados suspeitos ou inválidos, influem diretamente no processo de diagnóstico tornando-o uma tarefa bastante complexa.

Em (Duarte, 2003) relata que mesmo com a utilização de sistemas de automação e até sistemas especialistas (SE) nas subestações, ainda a solução dos problemas que ocorrem na subestação depende exclusivamente da experiência dos operadores e engenheiros de proteção, o que aumenta o retardo em resolver tais problemas, que por muitas vezes são inaceitáveis nos processos de restabelecimento do sistema de distribuição.

A aplicação de ferramentas inteligentes para o diagnóstico de defeitos tem sido proposta na literatura. Como tentativas iniciais, SE baseados em regras foram propostos em (Duarte, 2003), (Handschin and Hoffmann, 1992), (Kirschen and Wollenberg, 1994), (Liu and Tomsovic, 1987) e (Faria et al., 2002). Entretanto, SE são capazes de produzir bons resultados apenas para aquelas situações que foram consideradas durante seu desenvolvimento. A maior limitação desta aplicação reside na dificuldade de tratar padrões de alarmes novos ou corrompidos.

Por outro lado, redes neurais são tolerantes a falhas e capazes de aprender sobre um dado problema a

partir de um treinamento off-line, utilizando casos históricos ou simulados, representativos do domínio do problema, de modo a realizar inferências em tempo real (Haykin, 2008).

Em (Souza et al., 2001), foi proposto um método baseado em classificadores neurais, que apresenta bons resultados quanto a tolerância a falhas e resposta em situações de falha do sistema de proteção. Em alguns casos, porém, o fato dos classificadores neurais serem treinados para fornecer saídas binárias faz com que certos resultados não permitam uma interpretação adequada para posterior diagnóstico.

Em (Neto, 1997), um módulo de RNAs é sugerido, composto por um conjunto de quatro redes neurais independentes, cada uma especializada em um componente do sistema de transmissão (gerador, transformador, barra e linha). Este esquema de múltiplas RNAs, tem como vantagem a convergência bem como a capacidade de generalização.

Este trabalho propõe a utilização de uma metodologia híbrida, baseada em RNA e SE. Um SE será responsável pelo pré-processamento dos eventos enviados pelo sistema de controle e aquisição de dados (SCADA), que serão usados como variáveis de entrada para a rede neural enquanto outro será utilizado para o pós-processamento das saídas fornecidas pela rede neural de modo a identificar o componente defeituoso. Já a RNA terá como objetivo processar os eventos resultantes do pré-processamento para identificar o tipo de componente defeituoso.

Neste contexto, será proposto uma ferramenta computacional desenvolvida em Borland Delphi 7.0 que utiliza RNA e SE para auxílio à tomada de decisão nas subestações da Empresa Luz e Força Santa Maria S/A (ELFSM), que atua em 11 municípios do noroeste do estado do Espírito Santo (Colatina, Alto Rio Novo, São Gabriel da Palha, São Domingos do Norte, Vila Valério, Águia Branca, Pancas, Governador Lindenberg, Marilândia, São Roque do Canaã e Santa Tereza) e possui 6 subestações (Henrique Coutinho, Duas Vendinhas, São Gabriel, Colatina, São Silvano e São Roque).

## 2 Localização de Defeitos em Subestações

Após a ocorrência de um defeito, os elementos defeituosos devem ser isolados o mais rapidamente possível, evitando o risco de danos aos equipamentos da subestação. Além disso, deve-se levar em consideração que a interrupção no fornecimento de energia elétrica deve ser minimizado ou se possível, evitada. Portanto, os equipamentos de proteção, como relés e disjuntores, devem ser seletivos, ou seja, devem garantir que apenas os elementos sob defeito sejam desligados do sistema elétrico. Os relés de proteção devem ainda operar de forma

coordenada, de modo a oferecer proteção de retaguarda ao sistema.

Assim, se o equipamento de proteção responsável por isolar um certo elemento que se encontra sob defeito não operar corretamente, outros equipamentos de proteção deverão atuar de forma a eliminar o defeito. Normalmente neste caso, o número de elementos que são desligados é em geral maior que o necessário, o que pode dificultar a localização do elemento defeituoso na subestação, ocasionando ao mesmo tempo, um número muito elevado de informações que são geradas e transferidas para os centros de operação e distribuição (COD), para que os operadores possam produzir um diagnóstico e agir de forma a restabelecer as condições normais de operação.

Na maioria das perturbações ocorridas no sistema elétrico, é possível diagnosticar e agir imediatamente, através dos operadores das subestações. Porém durante grandes distúrbios ou naqueles envolvendo falhas de algum componente do sistema de proteção (relés, disjuntores, etc.), o diagnóstico nem sempre é imediato e ações indevidas podem vir a agravar as condições operativas em uma subestação.

A análise para identificação do defeito é baseada nas informações de operação dos relés de proteção, informações das proteções internas dos transformadores, além dos alarmes de abertura dos disjuntores. Sendo estas informações tratadas como eventos que ocorrem dentro de uma subestação. Assim, para obter a localização do defeito é necessário levar em conta estes diversos eventos que atuam em decorrência de um distúrbio. Os eventos e alarmes considerados neste trabalho são provenientes da operação dos dispositivos de proteção da subestação de São Gabriel - SG da ELFSM.

## 3 Sistemas Especialistas

(Passos, 1989) conceitua que um Sistema Especialista (SE) é um programa inteligente de computador que usa “raciocínio inferencial” para solucionar problemas de um campo específico do conhecimento humano. Sua característica principal é a capacidade de explicação, semelhante à encontrada nos seres humanos, dotados de alto grau de especialização.

Com o objetivo de ajudar os humanos, programas computacionais procuram reproduzir o raciocínio baseados no conhecimento, podendo propor soluções para os mais complexos problemas.

A Figura 1 ilustra a representação de um diagrama em blocos para um sistema especialista. Este mesmo é composto de dois módulos principais: máquina de inferência; e base de conhecimento. Além do bloco principal existe uma interface permitindo que os operadores ou engenheiros se comuniquem

com o sistema, sem a assistência de um programador.

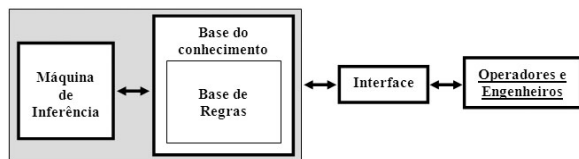


Figura 1: Estrutura básica do SE aplicado

A estrutura do SE aplicado na ferramenta, contém uma máquina de inferência (interpretador de regras), responsável por guiar o processo de raciocínio, através da base de conhecimento, comparando com o conjunto de regras, uma máquina de inferência que é o processador de conhecimento, e trabalha junto ao banco de conhecimento para chegar a um resultado.

#### 4 Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma grande rede neural artificial pode ter centenas ou milhares de unidades de processamento; já o cérebro de um mamífero pode ter muitos bilhões de neurônios.

As RNAs do tipo *Perceptrons*, com múltiplas camadas (redes MLP), treinadas com o algoritmo *backpropagation*, têm sido o modelo de RNA mais frequentemente utilizado em aplicações práticas de classificação de padrões. Sua simplicidade de operação e comprovado desempenho são as principais razões para tal popularidade (Rumelhart et al., 1986).

As unidades de uma RNA são organizadas em camadas e interligadas através de conexões ponderadas (sinapses). Em uma arquitetura MLP, a primeira camada, chamada camada de entrada, simplesmente propaga a informação para uma camada intermediária (ou camada escondida) que efetivamente realiza algum tipo de processamento, seguidas por uma camada de saída, de onde o resultado do processamento é obtido.

Uma das principais vantagens na utilização de redes neurais é o fato de que a identificação do defeito pode ser representada matematicamente como um problema típico de reconhecimento de padrões, e que é altamente desejável dispor de métodos rápidos e robustos para identificar o elemento defeituoso na subestação. Sendo estas algumas das características inerentes as RNAs.

#### 5 Metodologia Híbrida Proposta

Basicamente, o modelo proposto será composto de dois sistemas especialistas e uma rede neural. Um sistema especialista será responsável pelo pré-processamento dos eventos enviados pelo SCADA que serão usados como variáveis de entrada para a rede neural. Uma rede neural que irá processar os eventos resultantes do pré-processamento para identificar o tipo de componente defeituoso e não diretamente o componente defeituoso. E outro sistema especialista que será utilizado para o pós-processamento das saídas fornecidas pela rede neural de modo a identificar o componente defeituoso. A Figura 2 ilustra a metodologia proposta.

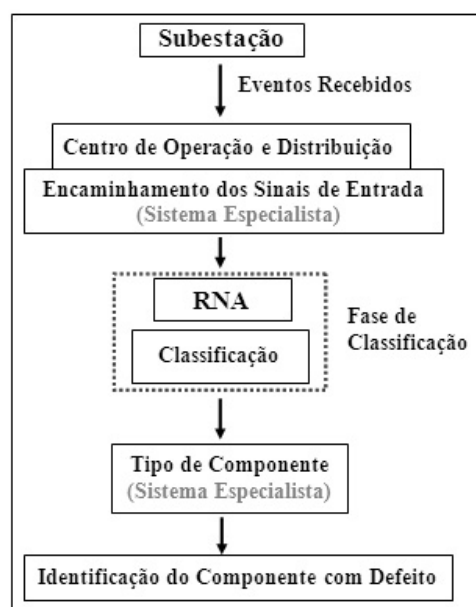


Figura 2: Metodologia proposta

A idéia principal desta proposta foi explorar as diferentes características inerentes de uma rede neural, principalmente a sua capacidade de reconhecer padrões. Já a idéia de usar sistemas especialistas no pré-processamento dos eventos e no pós-processamento das saídas da rede neural foi com o intuito de poder utilizar o modelo em qualquer subestação com as mesmas características variando somente no número de componentes típicos (DJ Entrada, Transformador e Alimentador).

Portanto, a estratégia de forma geral utiliza redes neurais para classificar apenas os equipamentos típicos, ou seja, não foram considerados, por exemplo, todos os alimentadores e sim apenas um alimentador, considerado como típico, o mesmo acontecendo para os outros tipos de equipamentos.

Uma vantagem considerável desta metodologia, é a possibilidade de se aplicar a mesma em qualquer subestação independente do número de componentes a serem monitorados, sempre respeitando o arranjo padrão (Alimentador, Transformador e Dis-

juntor de Entrada).

Na Figura 3 é ilustrado para  $n$  variáveis da camada de entrada,  $m$  da camada oculta e  $k$  da camada de saída. O modelo de RNA aplicado na ferramenta é MLP, com algoritmo de aprendizagem retropropagação (*backpropagation*), sendo  $n = 30$ ,  $m = 15$  e  $k = 3$ .

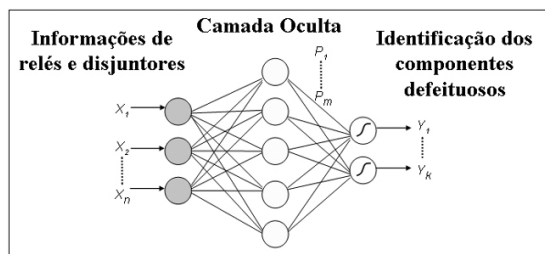


Figura 3: Arquitetura com múltiplas camadas em uma rede MLP

A definição dos  $n$  neurônios da camada de entrada foi uma das etapas mais importantes. Tarefa esta realizada em conjunto com os especialistas (operadores e engenheiro) da ELFSM, com o objetivo de reduzir a dimensão do problema tratado.

## 6 Ferramenta Computacional

Para modelagem computacional utilizou-se a Unified Modeling Language (UML), que é uma família de notação gráfica, apoiada por um metamodelo único, que ajuda na descrição e no projeto de sistemas de software, incluindo diagramas padronizados, utilizando, em especial, os diagramas de atividade, de componente e de instalação, além de técnicas de Interface Homem-Maquina (IHC). No setor elétrico é comum encontrar interfaces que são duras de apreender, difíceis de usar, confusas e totalmente frustrantes. Daí a necessidade de se trabalhar com afinco no projeto de interface da ferramenta.

Também se utilizou Extensible Markup Language (XML) para definição de parâmetros da subestação, o que permite aumentar a compatibilidade da ferramenta.

A ferramenta computacional foi desenvolvida em três módulos:

**Módulo de carregamento:** onde são carregadas as informações contidas nos arquivos de parâmetros em formato XML.

**Módulo de Processamento:** responsável por supervisionar os eventos enviados pelo SCADA, através da leitura em tempo-real do arquivo gerado. A ferramenta, ao verificar a ocorrência de qualquer distúrbio, inicia um temporizador, também conhecido como janela de tempo, no qual aguarda por 10 segundos ou conforme configurado nos parâmetros, antes de efetuar o processamento dos eventos.

Também neste módulo é aplicados o SE responsável pelo pré-processamento, o processamento da RNA e o pós-processamento com o outro SE.

Por último, o módulo de processamento envia as informações processadas diretamente para o módulo de resposta, responsável pela comunicação com o operador.

**Módulo de Resposta:** nesta etapa o sistema apresenta os resultados, com a descrição do(s) equipamento(s) com problema(s), além de ativar os recursos audiovisuais, indicando o(s) equipamento(s) defeituoso(s).

## 7 Testes e Resultados

O conjunto de treinamento para RNA contém as informações que representam diversos padrões de eventos das subestações, incluindo casos nos qual o sistema de proteção não atuou, gerando falhas em outros elementos da mesma. Estas informações foram obtidas através de entrevistas com os especialistas (operadores e engenheiros) e dados históricos da empresa.

O algoritmo utilizado para o treinamento foi (*backpropagation*), tendo sido utilizado uma taxa de aprendizado adaptativa. O modelo dos neurônios usou como função de ativação a função sigmóide, sendo como alvo o erro 0,00001 e o total de 15000 épocas em média. Também utilizou-se o termo *momentum* igual a 0,9. O treinamento foi realizado com base nos 120 padrões de eventos fornecidos pelos especialistas.

Para validar a metodologia proposta, foram testados 50 padrões de eventos inéditos, ou seja, padrões de eventos não utilizados na base do treinamento da RNA. Nesta etapa os resultados foram considerados satisfatórios pelos operadores, pois a RNA indicou corretamente o(s) equipamento(s) defeituoso(s). Além dos 120 padrões utilizados no treinamento da RNA.

Na Figura 4 é apresentada uma situação real, indicando suspeita de problema no Disjuntor de Entrada 138kV e no Alimentador, o que poderia dificultar a identificação do componente defeituoso.

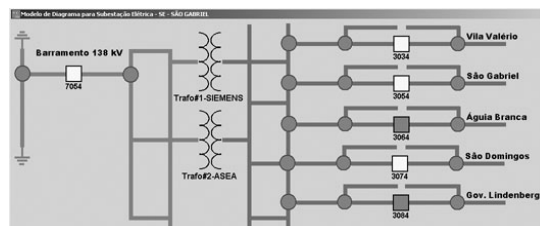


Figura 4: Diagrama da subestação São Gabriel

Após o processamento, conforme Figura 5, é apresentada à tela com o resultado da RNA em conjunto

com o SE, nesta figura se constata o resultado indicado pela ferramenta computacional, com as saída de **0,826** para problema no Alimentador, sendo o componente DJ3054 defeituoso da Linha de Distribuição de São Gabriel da Palha.

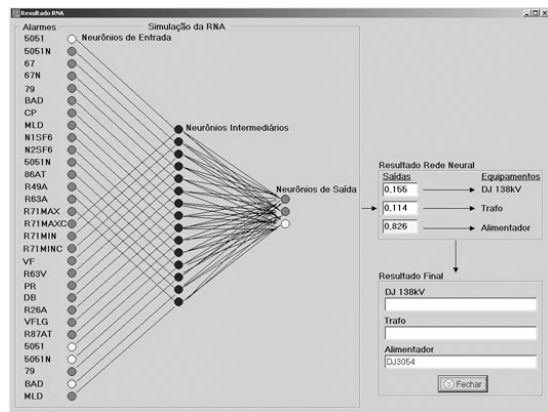


Figura 5: Resultado para um caso real

Através desta ferramenta foi possível proporcionar ajuda ao operador na tomada de decisão, pois mesmo com eventos indicando atuação do relé de sobrecorrente instantâneo para o Disjuntor de Entrada, diagnosticou corretamente que o problema estava no Alimentador da Linha de São Gabriel.

## 8 Conclusão

A necessidade de preservar a continuidade de serviço e garantir a qualidade do fornecimento de energia aos consumidores conectados a um sistema de energia elétrica torna essencial a rapidez e a precisão na identificação de equipamentos defeituosos, após a ocorrência de distúrbios.

Este trabalho apresentou uma metodologia que permite uma identificação rápida de equipamentos defeituosos em uma subestação de distribuição elétrica, após a ocorrência de distúrbios. Esta metodologia é baseada na utilização de uma ferramenta híbrida, os quais permitem a representação do conhecimento sobre o domínio do problema e ao mesmo tempo apresenta características de robustez, tolerância a falhas, generalização e reconhecimento de padrões.

A metodologia proposta foi testada para a subestação de São Gabriel da Palha. Os resultados obtidos indicaram um bom desempenho da ferramenta computacional, sendo possível obter identificações corretas para padrões não utilizados durante o processo de treinamento, incluindo situações nas quais existe falha do sistema de proteção, ruídos, etc. É importante notar que, uma vez treinadas, as redes apresentam um tempo de execução que pode ser considerado desprezível.

Deve-se destacar que os resultados obtidos com a ferramenta foram validados pelos operadores da

ELFSM, inclusive já apresentaram redução das perdas e custos, minimizando os riscos e otimizando os recursos da empresa, inclusive para problemas em múltiplos equipamentos.

## Agradecimentos

A equipe de profissionais da ELFSM nossos sinceros agradecimentos.

## Referências

- Duarte, A. (2003). Desenvolvimento de uma ferramenta de tratamento de eventos em redes elétricas, *V SIMPASE*, Recife, PE.
- Faria, V. R., Vale, M. I. M., de Araujo, L. E. and Vale, M. H. M. (2002). Sta - sistema para tratamento de alarmes: Uma ferramenta de auxílio a operação, *Simpósio de Especialistas em Operação de Centrais Hidroelétricas*, pp. 1–15.
- Handschin, E. and Hoffmann, W. (1992). Integration of an expert system for security assessment into a energy management system, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 14.
- Haykin, S. (2008). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 3th edn, Prentice Hall.
- Kirschen, D. and Wollenberg, B. (1994). Intelligent alarm processing in power systems, *Proc. of IEEE*, Vol. 80, pp. 663–672.
- Liu, C. and Tomsovic, K. (1987). An expert system as a dispatchers aid for the isolation of line section faults, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 2.
- Mcdonald, J. D. (2003). *Electric Power Substations Engineering*, Crc Press Llc, Florida.
- Neto, L. B. (1997). Sistema híbrido de apoio à decisão para detecção e diagnóstico de falhas em redes elétricas, *Dissertação (Mestre) - Curso de Engenharia Elétrica: Sistemas de Computação*, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, p. 203.
- Passos, E. L. (1989). *Inteligência artificial e sistemas especialistas*, Ltc, Rio de Janeiro.
- Rumelhart, D., Hinton, G. and Williams, R. (1986). Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, p. 323.
- Souza, J., Rodrigues, M., Schilling, M. and Filho, M. D. C. (2001). Fault diagnosis in electrical power systems using intelligent systems techniques, *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 59–67.