



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE 01
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS – GSE

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA NEBULOSA PARA DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Fernando Henrique Teodoro

ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

RESUMO

O artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de detecção e diagnóstico de falhas em transformadores de potência utilizando a Lógica Difusa, ou Lógica *Fuzzy*, que permite avaliar o estado operativo desse equipamento. As informações monitoradas do transformador e do sistema elétrico são processadas em tempo real e o resultado é utilizado para apoiar a tomada de decisões.

Os dados de saída desse sistema sinalizam a possibilidade de ocorrência de falha interna do transformador, objetivando agilizar a ação corretiva a ser tomada, reduzir o número de paradas programadas e ocasionais, e aumentar a vida útil dos transformadores de potência. Caso seja detectado um desvio em relação aos padrões de operação do equipamento, este desvio é analisado em maior profundidade, para uma avaliação mais precisa de suas causas, fornecendo à equipe de manutenção melhores condições para o planejamento de intervenções.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Monitoramento, Diagnóstico de falha, Sistema Especialista, Lógica *Fuzzy*.

1.0 - INTRODUÇÃO

No atual modelo do setor elétrico brasileiro, a remuneração das empresas transmissoras de energia elétrica está diretamente ligada à disponibilidade de suas instalações. Esta remuneração consiste, efetivamente, de um valor anual definido para cada instalação do seu Sistema de Transmissão, do qual serão subtraídos valores proporcionais às horas de indisponibilidade dessa instalação. Essa definição visa garantir a qualidade dos serviços de transmissão prestados pelas empresas, buscando maximizar a disponibilidade das instalações de transmissão, que é fundamental para o adequado funcionamento do Sistema Elétrico.

Neste contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de aplicações específicas de monitoramento e supervisão dos equipamentos envolvidos no sistema elétrico de potência, principalmente os transformadores de potência. Os transformadores de potência são essenciais no sistema interligado de energia elétrica e diversos parâmetros oriundos do envelhecimento natural ou acelerado dos mesmos são monitorados, tais como: concentração de gases dissolvidos no óleo isolante; temperatura do óleo, do enrolamento e do ambiente; e carregamento. Essas informações são processadas pelo sistema de inferência nebulosa na detecção e diagnósticos de falhas, o qual determina a possibilidade de ocorrência de uma falha.

Os benefícios da implementação desse sistema e da utilização dos seus recursos são:

- Incremento de agilidade e de precisão nos processos de engenharia;
- Aumento da vida útil dos transformadores instalados;
- Redução dos custos operacionais;
- Aperfeiçoar o sistema de proteção contra falhas internas de transformadores;
- Reduzir o número de paradas programadas e ocasionais.

Como sistemas capazes de processar eficientemente informações imprecisas e qualitativas de forma geral, os modelos de inferência nebulosa são especialmente adequados em processos que exigem tomadas de decisão por parte de operadores e gerentes de operação.

A ferramenta utilizada na concepção do sistema de inferência nebulosa na detecção de falhas em transformadores de potência provê os recursos para se criar e editar o sistema dentro de uma plataforma do software *MatLab*. A caixa de ferramentas da Lógica Difusa fornece um número de ferramentas que permite o acesso a muitas funções por meio da interface gráfica com o usuário. Juntas, estas interfaces dispõem de um ambiente para a montagem da arquitetura, implementação e análise do sistema de inferência nebulosa, representada pela Figura 1.



FIGURA 1: Diagrama de aplicativos computacionais para o desenvolvimento do sistema de inferência nebulosa: editor do sistema, da função membro e de regras, e ferramentas gráficas.

2.0 - METODOLOGIA

Na prática considera-se a ocorrência de uma falha interna em um transformador de potência quando, por exemplo, os valores da temperatura do óleo, da temperatura do enrolamento e do nível de óleo excederem um valor exato, definidos conforme as características construtivas de cada transformador. No entanto nesses padrões pode haver certo grau de incerteza inerente à própria natureza das medidas. Objetivando auxiliar o operador do sistema em sua decisão, é desenvolvido um sistema para o tratamento dessas incertezas, por meio da Lógica Difusa (Fuzzy).

Este sistema utiliza-se de grandezas monitoradas de um autotransformador (ATF), cujas características são as seguintes:

- Potência Trifásica Nominal: 672 MVA;
- Grupo de Ligação: 1 (Estrela aterrado/Delta aberto);
- Tensão Nominal: 525 / 230 / 13,8 (kV);
- Tipo: ONAF – Óleo Normal / Ar Forçado;
- Classe de Isolação: A (105°C).

2.1 Conjuntos Nebulosos e a Lógica Difusa

Os Conjuntos Nebulosos e a Lógica Difusa provêm a base para geração de técnicas poderosas para a solução de problemas, com uma vasta aplicabilidade, especialmente, nas áreas de controle e tomada de decisão. A força da Lógica Difusa deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspecto, o sistema de base nebulosa ou difusa tem habilidade de raciocinar de forma semelhante à dos humanos. Seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção.

A Lógica Difusa é baseada na teoria dos Conjuntos Nebulosos. Esta é uma generalização da teoria dos Conjuntos Tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeira ou falsa” da Lógica Clássica. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeira” ou “completamente falsa”. Entretanto, na Lógica Difusa, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a teoria dos Conjuntos Nebulosos estende a teoria dos Conjuntos Tradicionais. Os grupos são rotulados qualitativamente (usando termos lingüísticos, tais como: alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos destes conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto). Por exemplo, um homem de 1,80 metro e um homem de 1,75 metro são membros do conjunto “alto”, embora o homem de 1,80 metro tenha um grau de pertinência maior neste conjunto.

2.2 Sistema de Controle Nebuloso

A Lógica Difusa pode ser utilizada para a implementação de controladores nebulosos, aplicados nos mais variados tipos de processos. A utilização de regras nebulosas e variáveis lingüísticas conferem ao sistema de controle várias vantagens, incluindo:

- simplificação do modelo do processo;
- melhor tratamento das imprecisões inerentes aos sensores utilizados;
- facilidade na especificação das regras de controle, em linguagem próxima à natural;
- satisfação de múltiplos objetivos de controle;
- facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos;

2.3 Regras Nebulosas

A maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento nebuloso é a representação por meio de regras. Uma regra nebulosa normalmente é formada de duas partes principais:

IF <antecedente> THEN <conseqüente>

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas, mesmo parcialmente, determinam o processamento do conseqüente da regra por um mecanismo de inferência nebulosa. O processo acima descrito denomina-se disparo de uma regra.

Por sua vez, o conseqüente é composto de um conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados com o disparo da regra. Os conseqüentes das regras disparadas são processados em conjunto para gerar uma resposta determinística para cada variável de saída do sistema.

2.4 Modelos de Inferência Nebulosa

A semântica é que vai definir para o mecanismo de inferência como serão processados os antecedentes, quais serão os indicadores de disparo das regras e quais os operadores utilizados sobre os Conjuntos Nebulosos existentes, para executar o processamento de conhecimento. Tipicamente, utilizam-se modelos de inferência nebulosa específicos de acordo com as propriedades sintáticas definidas, ou seja, o modelo de processamento definido para o sistema de conhecimento vai depender basicamente da forma de armazenamento de informações escolhida. Para o sistema de apoio à decisão aqui proposto, utiliza-se o modelo de Mamdani nas inferências nebulosas.

2.5 Modelo de Mamdani

Mamdani (1974) propôs na década de 1970 um método de inferência nebulosa que foi por muitos anos um padrão para a utilização dos conceitos da Lógica Difusa em processamento de conhecimento. As regras de produção em um modelo de Mamdani possuem relações nebulosas tanto em seus antecedentes como em seus consequentes.

Como a maioria das aplicações de interesse possui sistemas convencionais de aquisição e atuação baseados em grandezas numéricas, o modelo de Mamdani inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em Conjuntos Nebulosos equivalentes e, posteriormente, as variáveis nebulosas geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes. Na Figura 2 é mostrado um diagrama típico de um sistema de processamento de conhecimento nebulosa que utiliza um modelo de inferência de Mamdani.

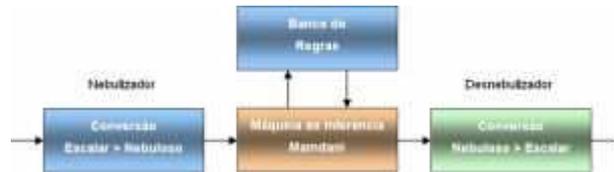


FIGURA 2: Diagrama típico de um modelo de inferência de Mamdani.

A regra semântica tradicionalmente utilizada para o processamento de inferências com o modelo de Mamdani é chamada de inferência Máx - Min. Ela utiliza as operações de união e de interseção entre conjuntos da mesma forma que Zadeh, por meio dos operadores de máximo e de mínimo, respectivamente.

Todas as regras para as quais o coeficiente de disparo for maior que zero são ditas regras que disparam para as entradas atuais. A conversão nebuloso→escalar transforma informações qualitativas em uma informação quantitativa, sendo um processo de especificação, chamado de “desnebulização”.

Os métodos mais utilizados para conversão nebuloso→escalar são: o método da média dos máximos e o método do centro de massa. O método da média dos máximos, o valor numérico da saída corresponde ao ponto do universo de discurso, que por sua vez corresponde à média dos pontos de máximo locais da função de pertinência do conjunto de saída produzidas pelo processo de inferência. Já o método do centro de massa, ou centróide, calcula-se, para um conjunto nebuloso de saída proveniente de uma Base de Conhecimento processada, a abscissa (no universo de discurso definido para a variável em questão) do ponto de centro de massa correspondente, e a utiliza como valor escalar de saída.

3.0 - SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

Após vários experimentos por meio da substituição da forma da função membro, modificação de seus parâmetros e alteração dos pesos das regras, a fim de que o sistema apresentasse uma saída satisfatória, ou seja, identificar corretamente as incidências de falhas em transformadores, chegou-se ao sistema mostrado na Figura 3 para o diagnóstico de falhas em transformadores.

O sistema proposto acima é composto por 6 (seis) entradas e 3 (três) saídas, conforme especificação que segue.

As variáveis de entrada do sistema são:

TO – Temperatura do óleo isolante; NO – Nível do óleo; AG – Analisador de gás dissolvido no óleo; TE – Temperatura do enrolamento; TA – Temperatura ambiente; CT – Carregamento.

As variáveis de saída do sistema são:

F1 – Falha 1: curto-circuito interno; F2 – Falha 2: sobreaquecimento; F3 – Falha 3: problemas no óleo isolante.

Em lógica difusa é necessário definir funções de pertinência, e mostrar “o grau de verdade” inerente a cada uma das variáveis, adjetivadas por nomes escolhidos pelo usuário (provável, alto, muito alto, normal, baixo, muito baixo, etc.) e que melhor as represente. O ato de associar a uma variável um conteúdo lingüístico significa “nebulizar” a variável.

Os valores lingüísticos associados às entradas do sistema de inferência são:

N – normal; U – urgência; E – emergência.

Os valores lingüísticos associados às saídas são:

N – normal; PP – pouco provável; P – provável; MP – muito provável; C – certo.

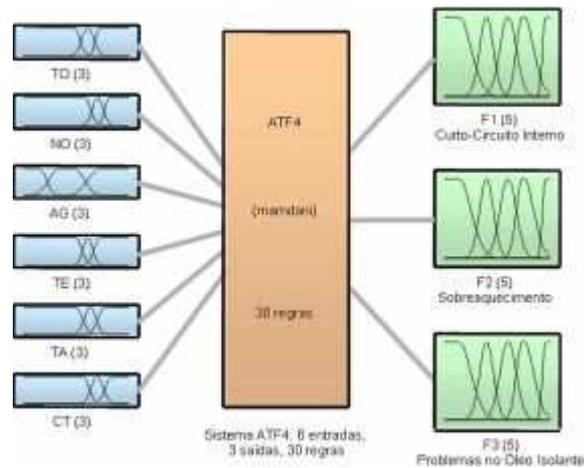


FIGURA 3: Sistema de Inferência Nebulosa.

3.1 Definição dos Conjuntos Nebulosos

Na construção do sistema nebuloso, as variáveis de entrada foram divididas em três categorias, conforme especificado abaixo. Os valores nebulosos para essas variáveis e os conjuntos nebulosos correspondentes são definidos em relação às especificações técnicas e ao Manual de Operação do equipamento. Por exemplo, a posição do conjunto nebuloso E (emergência) no universo para TE (temperatura do enrolamento) indica que o transformador opera fora das recomendações técnicas, o que implica em uma provável intervenção no equipamento para manutenção. A Figura 4 ilustra dois conjuntos nebulosos para variáveis de entrada.

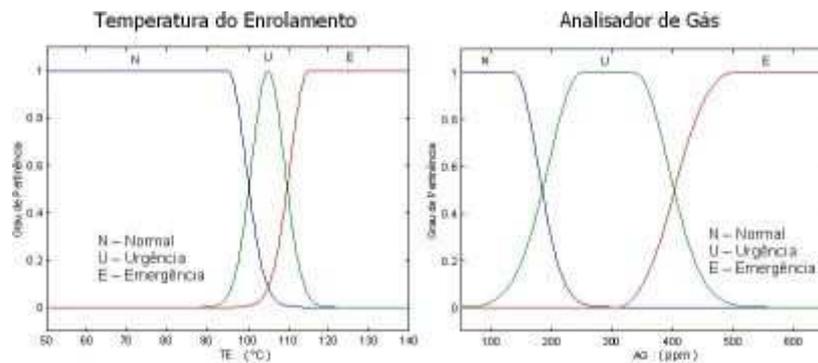


FIGURA 4: Conjuntos nebulosos para a temperatura do enrolamento e o analisador de gases dissolvido no óleo.

Em função dessas variáveis de entrada o sistema nebuloso define o percentual de ocorrência de falhas F1, F2 e F3 no transformador. As distribuições dos conjuntos nos universos, sua formas e domínios das variáveis de saída são ilustradas na Figura 5.

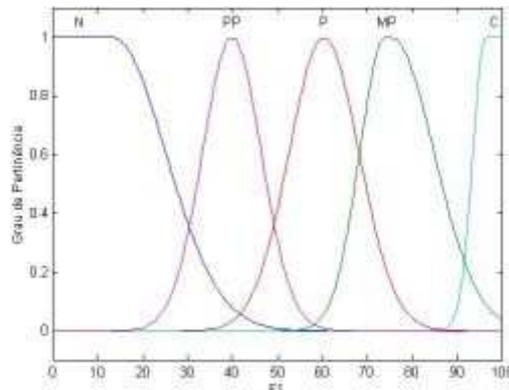


FIGURA 5: Conjuntos nebulosos para as variáveis de saída F1, F2 e F3.

Após a definição das variáveis de entrada e saída do sistema, e dos conjuntos nebulosos associados a cada variável, faz-se necessário o desenvolvimento de regras de inferência, objetivando a agregação destes conjuntos nebulosos e a determinação das possibilidades de ocorrência de falhas no transformador.

3.2 Definição das Regras de Inferência

O conjunto de regras foi obtido por meio de entrevistas realizadas com diversos especialistas do setor e refletem a experiência desses profissionais, aliada ao conhecimento do problema de detecção e diagnóstico de falhas em transformadores de potência. A partir dessas informações, determinam-se as possibilidades com que essas falhas ocorram.

Um exemplo de construção de regra de inferência para a falha de um curto-circuito interno é definida da seguinte maneira:

SE a Temperatura Óleo = "normal" E o Nível de Óleo = "normal" E o Analisador de Gases = "urgência" E a Temperatura do Enrolamento = "advertência" E a Temperatura Ambiente = "normal" E o Carregamento do Transformador = "normal" ENTÃO falha 01 = "muito provável".

No entanto, se as características de carregamento do transformador estiverem sendo modificadas, em um período de muito calor, poderá estar havendo um aumento nos níveis de gases dissolvidos no óleo isolante oriundos de um sobreaquecimento.

O sistema de inferência nebulosa permite que as variáveis de entrada acionem esse conjunto de regras e faça implicações sobre as variáveis de saída. Os valores percentuais de cada falha (F1, F2 e F3) são retornados por meio do processo de "desnebulização" do resultado da agregação.

Para a montagem do sistema tipo Mamdani utilizou-se os seguintes processos: lógica E (min); lógica OU (max); implicação (min); agregação (soma); desnebulização (centróide).

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo, será apresentado um caso que acontece com muita frequência, onde o transformador de potência encontra-se em operação normal de funcionamento e as grandezas monitoradas são alteradas, colocando o operador em estado de alerta. Essas informações são processadas pelo sistema de inferência nebulosa na detecção e diagnósticos de falhas, e determina a possibilidade de ocorrência de uma falha.

Num caso hipotético onde os níveis de leitura das variáveis de entrada estão sendo alterados, com tendência a ocorrer uma falha, o operador entra apenas em estado de alerta, aguardando a próxima leitura, sem tomar nenhuma atitude corretiva. A Figura 6 ilustra o resultado do processamento de uma leitura crítica, com os níveis indicados no cabeçalho da mesma. Se o sistema de diagnóstico de falha fosse do tipo convencional, que utiliza a lógica binária para mapear os alarmes (operado e normalizado), certamente com níveis semelhantes aos dessa leitura os alarmes relativos a TO e TE, estariam operados e seria configurada a falha por sobreaquecimento. Nesse caso seria tomada alguma providência no sentido de minimizar a sobrecarga, porém desnecessária caso esses níveis retornem à região normal de operação.

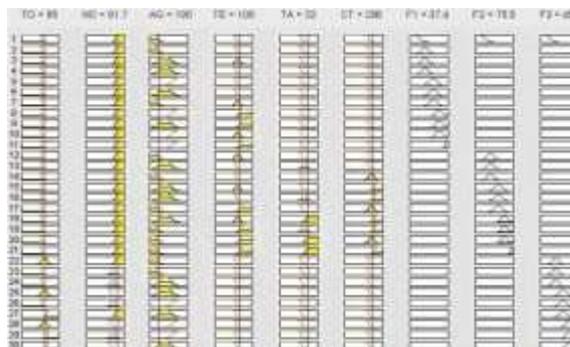


FIGURA 6: Resultado das regras de inferência do sistema.

5.0 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que a técnica adotada é adequada para a detecção e o diagnóstico de falhas em transformadores de potência, pois há uma grande quantidade de informações a respeito do seu estado operativo,

de dados com imprecisões inerentes aos sistemas de medição e a lógica fuzzy trata muito bem dessas incertezas. Hoje, esses conceitos de conjuntos nebulosos são estendidos a técnicas de otimização a qualquer componente do sistema elétrico de potência.

O sistema inteligente dá agilidade ao diagnóstico, fornece ao pessoal de operação e manutenção ferramentas que antes eram exclusivas de laboratórios de análises e de pessoal altamente especializado, reduz custos, incentiva e multiplica o conhecimento dentro da empresa.

Nesse escopo, torna-se necessário reavaliar, constantemente, os critérios de manutenção dos equipamentos, de forma a minimizar as indisponibilidades programadas, porém, tendo sempre em vista que essa ação não pode implicar redução da confiabilidade, pois uma perda intempestiva ou não programada dos equipamentos provocará em perda de receita substancialmente maior. Há a necessidade de se tomarem, sistematicamente, decisões a respeito de alterações de procedimentos de manutenção, implantação de sistemas de monitoramento de equipamentos, substituição de equipamentos obsoletos ou com desempenho inadequado e outros aspectos relacionados aos processos de manutenção.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ZADEH, L. A. *Fuzzy Sets, Int. Journal of Information and Control*, 1965, 338-53.
- (2) MAMDANI, E.; ASSILIAN, S. *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man Machine Studies*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13. 1975.
- (3) LEVINE, R. I. "Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas" - Editora McGRAW-HILL, 1988.
- (4) GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHHEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos *fuzzy*, lógica *fuzzy* e aplicações. *Proceedings of 6th International Fuzzy Systems Association World Congress - IFSA95, Tutorials*, pp. 1-38. 1995.
- (5) KLIR G. J.; YUAN B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*. Prentice Hall, NJ, 1995.
- (6) SILVA V. N. A. L. da; ZEBULUM R. S. *An Integration of Neural Networks and Fuzzy Logic for Power Systems Diagnosis. Proceedings from Intelligent Systems Applications to Power Systems*, Janeiro 96, Orlando, Florida, USA.
- (7) MACHADO R. J.; ROCHA A. F. da. *Inference, Inquiry, Evidence Censorship, and Explanation in Connectionist Expert Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 5, N. 03, pp. 443-459, agosto de 1997.
- (8) CHEIM, L. Sistema Inteligente de Diagnóstico de Transformadores de Potência. XV SNPTEE, Grupo VIII, GSE, 1999, Foz do Iguaçu, Brasil.
- (9) JANG, J.S.R.; GULLEY, N. *Fuzzy Logic Toolbox, for use with MATLAB*. V2.1.3 The MathWorks, Inc. MA: 2004.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fernando Henrique Teodoro

Nascido em Botucatu, SP em 12 de dezembro de 1978.

Especialização (2007): UFSC-Florianópolis, Especialização (2004): UTFPR-Cornélio Procópio e Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: UEL-Londrina.

Empresa: ELETROSUL Centrais Elétricas, desde 2002.

Engenheiro do Departamento de Manutenção do Sistema.