

**GRUPO VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

**SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY NO DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES**

**Luiz Biondi Neto (\*)  
Universidade Veiga de Almeida**

**Luis Chiganer  
Universidade Veiga de Almeida**

**RESUMO**

Por mais modernos e eficientes que possam ser, os transformadores estão sujeitos a incidências de falhas. Atualmente os esquemas de proteção podem oferecer maior sensibilidade no sentido de preservar não só os transformadores bem como os demais equipamentos do sistema elétrico.

Contudo, cabe ao operador, analisar múltiplos alarmes e então tomar a decisão que colocará o sistema em operação normal. Esses sinais de alarme partem de sensores, que são ajustados para atuar dentro de um certo grau de incerteza, dificultando o diagnóstico seguro da falha.

O presente trabalho visa apoiar a decisão do operador, usando-se um sistema especialista Fuzzy que trata adequadamente essas incertezas.

**PALAVRAS-CHAVE:**

Diagnóstico de Falhas - Sistema de Apoio à Decisão – Lógica Fuzzy - Sistemas Especialistas.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Visando proteger os transformadores contra falhas são usados basicamente, o sistema de análise de gás e a proteção diferencial. Cada tipo de proteção envolve diversos equipamentos sendo destacados os sensores, que em situações de anormalidade de funcionamento enviam sinais

com o objetivo de finalmente, acionar os equipamentos de proteção como relés, disjuntores, etc e preservar o sistema elétrico.

Assim, um conjunto específico desses sinais podem caracterizar indícios de uma falha ou, em casos extremos, a ocorrência de fato de uma situação de urgência, onde a falha fica muito bem caracterizada.

Como estabelecer estes padrões? Na prática considera-se a ocorrência de uma falha quando, por exemplo os valores da temperatura do óleo e da temperatura do enrolamento e da sobrecorrente de fase e do fluxo do óleo excederem “*rigorosamente*” um valor exato, ou será que esses padrões têm um certo grau de incerteza inerente a própria natureza das medidas.

Este trabalho, visa auxiliar o operador do sistema em sua decisão, tratando essas incertezas através do uso de Lógica Fuzzy. Um outro ponto que merece destaque é o fato do sistema investigado poder servir como validador de falhas, caso estas sejam detectadas por um operador humano, ou por um sistema inteligente composto de um conjunto de redes neurais artificiais (5,7).

Os resultados obtidos indicam que a técnica adotada é adequada para detecção e diagnóstico de falhas, especialmente quando o número de equipamentos de proteção é grande e envolvendo certo grau de incerteza nos sinais dos alarmes.

**2.0 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

## 2.1 – Proteção de Transformadores

Os transformadores, são afetados geralmente por ocorrência de curtos-circuitos nos enrolamentos, sobreaquecimento e circuito aberto. A falha de maior incidência é a fase-terra, embora possam ocorrer falhas, fase-fase, espira-espira ou do enrolamento de alta para o de baixa tensão. Essas falhas, podem ser de ocorrência rápida ou lenta. Como os casos de circuito aberto são raros e quando acontecem não são destrutivos, é possível classificar a proteção de um transformador em dois grupos: proteção contra sobrecarga, que evita o envelhecimento prematuro do isolante dos enrolamentos; e contra curtos-circuitos entre espiras e fases.

Assim, dependendo da situação, podem ser usados os seguintes relés para proteger um transformador:

- Relé Diferencial;
- Relé de Buchholz;
- Relé de Sobrecorrente Instantâneo;
- Relé de Sobrecorrente Temporizado;
- Relé de Imagem Térmica.

A proteção diferencial percentual de transformador é capaz de eliminar curtos-circuitos internos, inclusive curto entre espiras, bem como os efeitos decorrentes de arcos nas buchas. Nesse esquema de proteção, compara-se as correntes de entrada e saída do elemento protegido, e o relé opera quando a diferença entre essas correntes ultrapassa um valor de ajuste percentual (7).

Embora a construção dos novos transformadores tenha alcançado um nível de qualidade bastante elevado, é preciso considerar que: os transformadores estão sujeitos a sobretensões de origem atmosférica; a aquecimento anormal nos enrolamentos, devido a sobrecarga temporária ou permanente; e que esses fatores podem conduzir a incidência de falhas monofásicas ou trifásicas.

## 2.2 – Lógica Fuzzy

A linguagem e a maneira de pensar dos seres humanos, contempla termos vagos, incertos e dependentes de contexto. No caso investigado, é comum dizer que a temperatura do óleo de um transformador está alta ou que a corrente no enrolamento BT está muito alta e mesmo sem definirmos exatamente o valor da temperatura ou da corrente, isto é perfeitamente entendido por

qualquer técnico da área. Na lógica tradicional (Boole) por exemplo, para a temperatura do óleo do transformador ser considerada alta ou não é preciso correlacioná-la com um certo valor padrão. Sem estabelecer uma referência exata é impossível determinar se a afirmação " A temperatura do óleo de transformado é alta" é falsa ou verdadeira. Se o padrão de referência fosse 100 °C a temperatura de 101 °C seria considerada alta e a de 99 °C não alta, conforme mostra a figura 1.

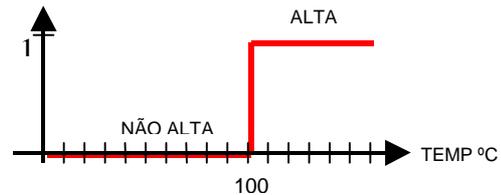


Figura 1 - REPRESENTAÇÃO BINÁRIA

Assim, pela teoria dos conjuntos, a temperatura superior aos 100 °C pertence ao conjunto das temperaturas altas e inferior a 100 °C ao conjunto das temperaturas não altas. Em outras palavras, nessa teoria quando um elemento pertence a um conjunto ele é dito "*membro do conjunto*", caso contrário não é "*membro do conjunto*". A mudança abrupta em 100 °C "*de não alta para alta*" é contra o senso comum do pensamento humano (1).

A lógica Fuzzy, evita o problema, permitindo que um elemento possa pertencer parcialmente a um dado conjunto como acontece nas afirmações: A temperatura é alta, muito alta, normal etc. Assim cada uma dessas afirmações lingüísticas, representa um certo grau de pertinência (parte da verdade) a um conjunto (2). Dessa forma, em lógica Fuzzy um elemento pode pertencer a um conjunto com um certo grau, por exemplo 90 % ou 10 %, diferentemente da lógica binária, cujo grau de pertinência é sempre 0 % ou 100 %.

O mesmo exemplo da temperatura do óleo do transformador pode ser representado em Lógica Fuzzy conforme a figura 2.

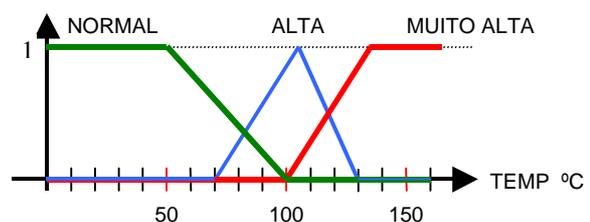


Figura 2 - REPRESENTAÇÃO FUZZY

Um outro ponto marcante no pensamento humano, reside na existência de conexões entre causa e efeito (implicação lógica), isto é, entre as premissas e as conseqüências (3).

Dessa forma, regras, naturais ou não, denominadas "regras de inferência" modelam o problema e normalmente são expressas da seguinte forma:

Se **premissa 1 = X** e **premissa 2 = Y**, então **conseqüência = Z**, onde X, Y e Z representam parte da verdade e não, simplesmente 0 e 1, F e V, como na lógica binária.

No caso investigado, poderíamos escrever, por exemplo, a seguinte regra:

Se a Pressão do Óleo = "muito alta" E a Temperatura do Óleo = "alta" E o Fluxo do Óleo = "alto" E a Temperatura do Enrolamento = "muito alta" ENTÃO falha 01 = "muito provável" Para compor o conjunto de regras, uma série de entrevistas devem ser feitas com os especialistas da área em estudo, visando transformar o conhecimento prático desses profissionais em regras de inferência (4).

Em lógica Fuzzy é necessário definir funções de pertinência, mostrando "o grau de verdade" inerente a cada uma das variáveis, adjetivadas por nomes escolhidos pelo usuário (*provável, muito provável, alto, muito alto, normal, advertência, urgência, etc*) e que melhor as represente. O ato de associar a uma variável um conteúdo lingüístico significa "fuzzificar a variável". Depois de "fuzzificar" as variáveis, é preciso definir o domínio de cada uma e dividi-las em faixas. A figura 3 mostra uma variável "fuzzificada" de entrada (temperatura do óleo) e seus respectivos domínios.

### ADJETIVOS

- N - Normal
- A - Advertência
- U - Urgência

### Temperatura do Óleo

Figura 3 - VARIÁVEL FUZZIFICADA

Construídos os conjuntos Fuzzy, com seus respectivos adjetivos e domínios, tais como, de temperatura, pressão, fluxo, ocorrência de falha, etc, são estabelecidas, junto aos especialistas, o conjunto de regras de inferência que definem o problema (6).

Um "motor" de inferência (7) permite que as variáveis de entrada acionem as regras, definindo assim a situação (forma) da variável correspondente de saída, como vista na figura 4.

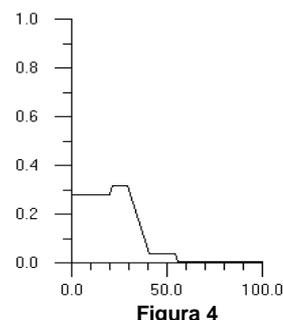


Figura 4

Através de um processo de "defuzzificação" das variáveis de saída, normalmente feito pelo cálculo do CENTROIDE da função, os valores numéricos são retornados, conforme pode ser constatado na figura 5, que mostra os valores percentuais de cada ocorrência de falha (OF1 ...7).

OF1	OF2	OF3	OF4	OF5	OF6	OF7
95.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

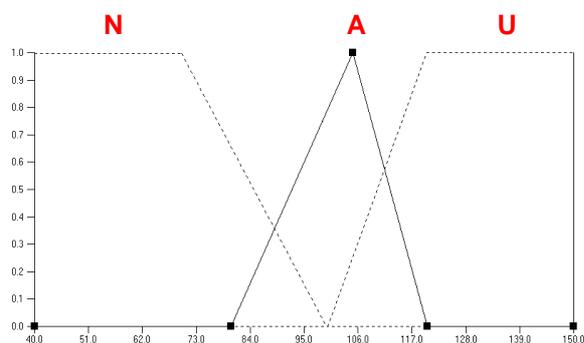
Figura 5 - RESULTADO DA DEFUZZIFICAÇÃO

### 3.0 – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

As características técnicas dos equipamentos são as seguintes:

#### TRAFO PRINCIPAL

- Potência Nominal : 40 MVA
- Grupo de Ligação - Delta-estrela-aterrado
- Tensão Nominal : 138 kV



- Tipo : OFAF - Óleo Forçado / Ar Forçado.
- Classe de Isolação : A (105 ° C)
- **TC**
- Primário – 2000 / 5
- Secundário – 200 / 5
- **PROTEÇÃO**
- 87 - Relé Diferencial
- 86 - Relé de Bloqueio
- 50 - Bobina de Atração - Sobrecorrente de fase
- 50N - Bobina de Atração - Sobrecorrente de neutro
- 51 - Disco de Indução - Sobrecorrente de fase
- 51 N - Disco de Indução - Sobrecorrente de neutro
- 52 - Disjuntor de Corrente Alternada
- 26 - Dispositivo Térmico Capilar
- 49 - Relé Imagem térmica
- 63 - Relé Buchholz

O esquema de proteção escolhido é representado na figura 6.

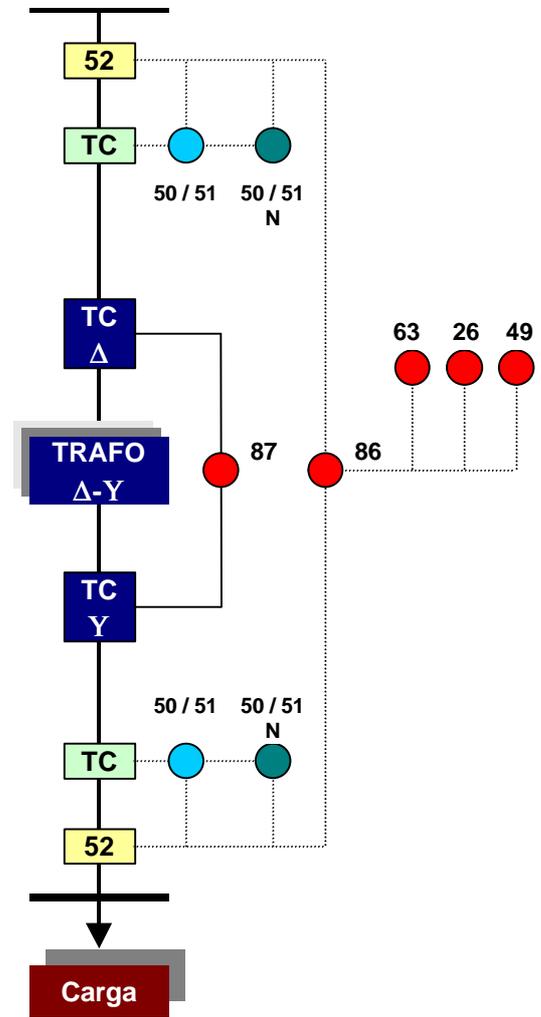


Figura 6 - ES

#### 4.0 – DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

A escolha das variáveis de entrada e saída partiu dos dados fornecidos pelos especialistas, que em função do esquema de proteção adotado, definiram as variáveis de interesse através de seus limites, identificando situações de operação normal, advertência e urgência. Essas variáveis adjetivadas, especificadas a seguir, formam o conjunto de variáveis de entrada e saída foram introduzidas na ferramenta computacional, no caso o CUBCALC da Hyperlogic Corporation. Nas figuras 7 e 8 são mostradas, respectivamente, uma variável de entrada e uma de saída das 16 variáveis definidas para esse trabalho (4).

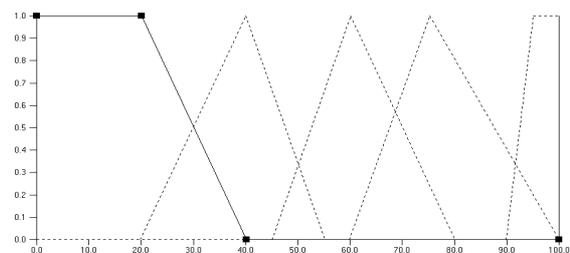
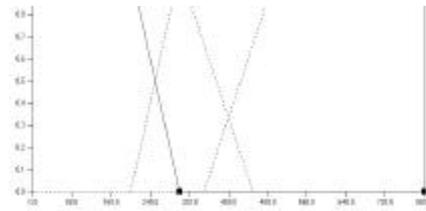


Figura 7 - SOBRECORRENTE DE FASE - INSTANTÂNEO



### VARIÁVEIS DE ENTRADA

- TO - Temperatura do óleo
- FO - Fluxo do óleo
- NO - Nível do óleo
- TE - Temperatura do enrolamento
- SCFI - Sobrecorrente de fase - Instantâneo
- SCFT- Sobrecorrente de fase –Temp.
- SCNI - Sobrecorrente de neutro –Inst.
- SCNT- Sobrecorrente de neutro – Temp.
- DIF - Proteção Diferencial

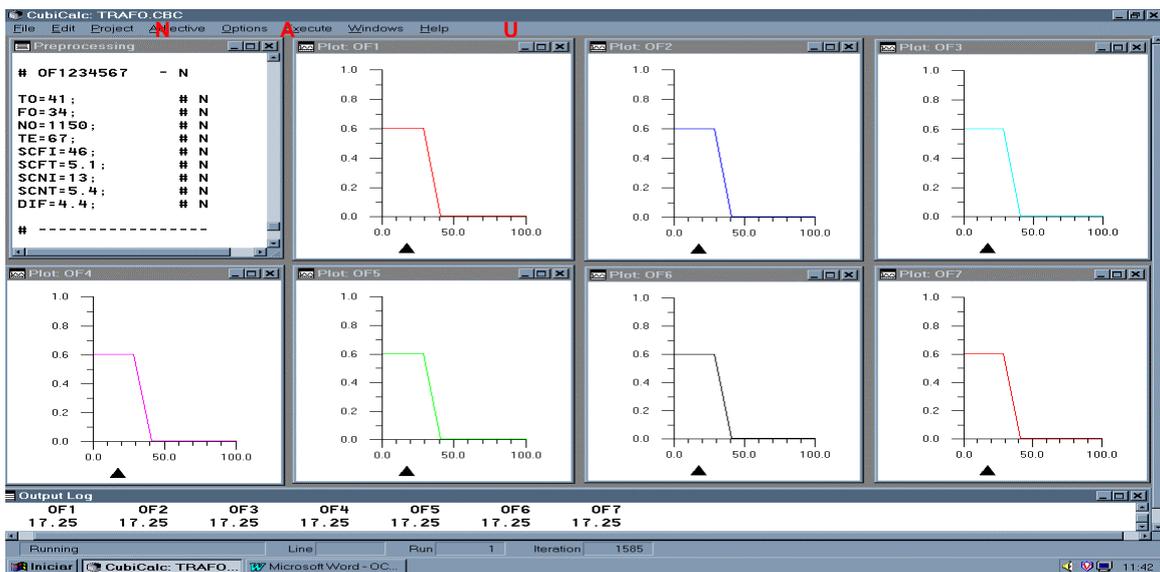
### VARIÁVEIS DE SAÍDA

- OF1 - Ocorrência da Falha 01
- OF2 - Ocorrência da Falha 02
- OF3 - Ocorrência da Falha 03
- OF4 - Ocorrência da Falha 04
- OF5 - Ocorrência da Falha 05
- OF6 - Ocorrência da Falha 06
- OF7 - Ocorrência da Falha 07

### ADJETIVOS

*Var. Saída*

- N - Normal
- PP - P. Provável
- P - Provável
- MP - M. Provável
- C - Certo



N - Normal  
 A - Advertência  
 U - Urgência

Figura 9 - RESULTADOS DO SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY

## 5.0 – ESPECIFICAÇÃO DAS REGRAS

O conjunto de Regras foi obtido através 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 elétricos (7). Na tabela 1 são mostradas as possibilidades de ocorrência da falha OF 7, para as demais ocorrências, tabelas semelhantes foram preparadas. Posteriormente, essas tabelas foram transformadas em regras e incorporadas a ferramenta computacional, sendo cada uma ponderada por pesos, sugeridos pelos técnicos da área. Como exemplo de construção de regra, poderíamos apresentar o seguinte:

**SE** *TO=Advertência* **E** *TE=Normal* **E** *SCFI=Normal* **E** *SCFT=Normal* **E** *SCNI=Normal* **E** *SCNT=Normal* **E** *DIF=Normal* **E** *NO=Urgência* **E** *FO=Urgência* **ENTÃO** *OF7 = Muito Provável*

**Tabela 1 - FALHA 7 - PROBLEMAS NO ISOLANTE**

T	T	SC	SC	SC	SC	DIF	N	F	OF7
O	E	FI	FT	NI	NT		O	O	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
U	N	N	N	N	N	N	U	U	C
A	N	N	N	N	N	N	U	U	MP
U	N	N	N	N	N	N	A	U	MP
U	N	N	N	N	N	N	U	A	MP
A	N	N	N	N	N	N	A	U	P
A	N	N	N	N	N	N	U	A	P
U	N	N	N	N	N	N	A	A	P
N	N	N	N	N	N	N	A	A	PP
N	N	N	N	N	N	N	N	A	PP
A	N	N	N	N	N	N	N	N	PP
A	N	N	N	N	N	N	A	N	PP

A estratégia de execução das regras adotadas usou os seguintes parâmetros:

- Escala de adjetivos de saída : mínimo
- Combinação de regras : somatório
- Defuzzificação: Centróide

## 6.0 – ESTUDO DE CASOS

Foram realizados cerca de 240 testes de ocorrências de falhas. Todos os testes são casos reais, fornecidos pelos especialistas e obtidos de dados históricos arquivados na empresa de serviços de eletricidade. Nesta seção será apresentado um caso, que acontece com muita frequência, onde o sistema encontra-se em

operação normal de funcionamento. As medidas observadas foram as seguintes:

- **TO** = 41 °C
- **TE** = 34 °C
- **SCFI** = 1150 A
- **SCFT** = 67 A
- **SCNI** = 46 A
- **SCNT** = 5.1 A
- **DIF** = 13 A
- **NO** = 5.4 l
- **FO** = 4.4 cm/s

Os resultados obtidos pelo Sistema Especialista Fuzzy, mostrados na figura 9, indicam o grau de verdade da ocorrência de cada uma das sete falhas previstas, estão representados em valores percentuais e indicam operação normal.

## 7.0 – CONCLUSÕES

A análise dos resultados revelou, segundo a opinião dos técnicos da área, que os resultados apresentados pelo Sistema Especialista Fuzzy encontram-se dentro dos padrões de qualidade exigidos pelas concessionárias de energia elétrica. Um ponto que mereceu destaque por parte dos especialistas humanos diz respeito a segurança dos resultados. Quando são usados operadores pouco experientes, para garantir certa segurança, estes têm de consultar manuais, catálogos etc e isso inviabiliza o processo devido a lentidão na ação corretiva a ser tomada.

Os dados mostrados na tabela 2, ocorrências de 51 a 56, são casos reais e foram colhidos do histórico de ocorrência de uma concessionária de energia elétrica. Quando essa seqüência ocorre, pode levar operadores inexperientes ou desatentos a tomarem decisões equivocadas.

**Tabela 2 - MEDIDAS EFETUADAS**

	TO	FO	NO	TE	SC	SC	SC	SC	DIF
					FI	FT	NI	NT	
<b>51</b>	43	30	1110	60	58	5.7	10	5.1	4.5
<b>52</b>	100	75	870	110	55	5.4	12	10.2	4.4
<b>53</b>	99	113	540	101	49	25	19	10	4.8
<b>54</b>	145	117	520	100	49	28	15	12	4.7
<b>55</b>	97	114	550	105	47	27	14	10	4.4
<b>56</b>	101	76	880	108	53	5.5	14	10	4.4

Os resultados do Sistema Especialista Fuzzy são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - RESULTADOS DO SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY

	OF1	OF2	OF3	OF4	OF5	OF6	OF7
51	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25
52	0	0	0	39.40	0	0	0
53	0	0	0	64.25	0	0	0
54	0	0	0	78.38	0	0	0
55	0	0	0	69.55	0	0	0
56	0	0	0	40.13	0	0	0

A ocorrência 51 indica que o transformador opera normalmente, 17.25%. Na ocorrência 52 pequena alteração é notada em TO, FO, NO e TE levando o sistema a indicar 39.40 % de chance de ocorrer a falha 4, porém pouco provável. Na ocorrência 53 as alterações são ainda mais acentuadas e a saída indica ser provável a falha 4, 64.25 % de chance. Na ocorrência 54 as alterações são maiores, indicando ser muito provável a ocorrência da falha 4 com saída em 78.38 %.

Se o sistema de diagnóstico de falha fosse do tipo tradicional (7), funcionando puramente através de mapeamento de alarmes (falso e verdadeiro), certamente com níveis semelhantes aos da ocorrência 54 os alarmes relativos a TO, FO, NO e TE estariam ativados (verdadeiro) e seria configurada a falha 4. Nesse caso alguma providência forçosamente seria tomada no sentido de minimizar a sobrecarga, porém desnecessária.

Entretanto, com o Sistema Especialista Fuzzy, na ocorrência 54, onde as alterações são maiores, o operador entra apenas em estado alerta, aguardando a próxima medida, sem tomar nenhuma atitude corretiva. Na ocorrência 55 então, a situação regride para saída de 69.55% e finalmente na ocorrência 56, verifica-se ser pouco provável a ocorrência da falha 4, confirmando a falta de necessidade de se tomar qualquer atitude corretiva, conforme seria feito em sistemas tradicionais, que usam lógica binária.

Face aos resultados obtidos, nos sentimos encorajados em intensificar pesquisas no sentido de adotar os Sistemas Especialistas Fuzzy na detecção e diagnóstico de falhas em qualquer componente de um sistema elétrico.

## 8.0 – BIBLIOGRAFIA

(1) ARAKY S., NOMUTA H., HAYASHI I. AND WAKAMI, N., A Fuzzy modelling with iterative generation mechanism of fase Fuzzy

inference rules, J. Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, 1992.

(2) BROWN & HARIS C., Neurofuzzy adaptive modelling and control, Prentice Hall, 1994.

(3) DRIANKOV D., HALLENDOORN H. AND REINFRANK M., An introduction to fuzzy control, Springer – Verlag, Berlin, 1993.

(4) KIM J. W., AHN L. S., AND YI Y. S., Fuzzy logic for the applications to complex systems., World Scientific Publishing, 1995.

(5) V. NAVARRO A. L. DA SILVA AND RICARDO S. ZEBULUM, An integration of neural networks and fuzzy logic, for power systems diagnosis, Intelligent Application to Power Systems (ISAP96) , pp. 237-241, Orlando, EUA, Jan 1996.

(6) W. R. BECRAFT & P. L. LEE, An integrated neural network/expert system approach for faults diagnosis, Computers CHEM. ENG. , Vol 17, n ° 10, pp 1001-1014, 1993.

(7) LUIZ BIONDI NETO, MARCO AURÉLIO C. PACHECO, MARLEY M. B. R. VELLASCO, EMMANUEL P. L. PASSOS E LUIS CHIGANER, Sistema híbrido de apoio à decisão para detecção e diagnóstico de falhas em redes elétricas, III Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, pp 197-204, Brasil, 1996.