

**GRUPO VIII  
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)**

**SISTEMA INTELIGENTE DE DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Luiz Cheim<sup>(\*)</sup>

Verônica Varella

Carlos Dupont

Rachel Páal

**CEPEL**

**RESUMO**

O artigo apresenta os resultados atuais do Software AIDA (Análise e Diagnóstico por Inteligência Artificial) desenvolvido pelo CEPEL dentro do escopo do projeto institucional SID (Sistema Inteligente de Diagnóstico e Monitoramento de Transformadores de Potência) patrocinado pelas empresas concessionárias CHESF, FURNAS, ELETRONORTE e ELETROSUL. O trabalho visa demonstrar a aplicabilidade do programa e o estágio atual de implantação nas subestações pilotos da CHESF e da ELETRONORTE, particularmente na SE Guamá, Belém, PA.

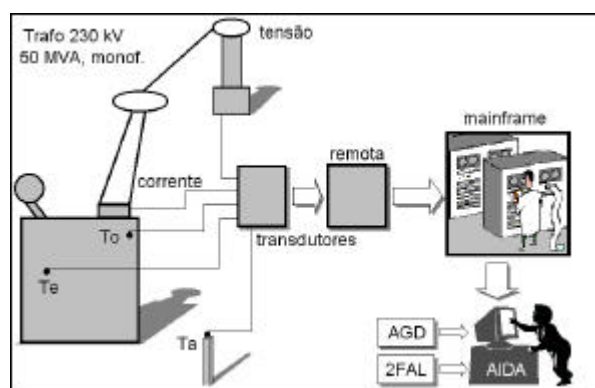
**PALAVRAS CHAVE**

Transformadores - Diagnóstico - Inteligência Artificial

**1.0 – INTRODUÇÃO**

A demanda crescente por energia e a sobrecarga atual dos sistemas de potência exigem a utilização de ferramental capaz de aumentar a confiabilidade e reduzir o número de paradas programadas e ocasionais, otimizando assim o fornecimento de energia elétrica e o uso das instalações. Além disso, a implantação de subestações desassistidas é uma tendência importante atualmente presente no planejamento da expansão de praticamente todas as empresas do setor elétrico Brasileiro, o que reforça a necessidade de utilização de sistemas *on-line* de supervisão e controle. Seguindo essa tendência, o trabalho apresenta a aplicação de um sistema inteligente de diagnóstico do estado operativo de

grandes transformadores, desenvolvido no CEPEL a partir da análise integrada do comportamento de diversos parâmetros oriundos do envelhecimento natural ou acelerado do transformador, tais como: concentração de gases dissolvidos no óleo isolante, taxa de evolução dos gases, grau de polimerização do papel isolante (GP), teor de 2-Furfuraldeído (2-FAL), expectativa de vida e perda de vida percentual, temperatura do óleo, ambiente e do enrolamento, além do carregamento. A análise integrada das variáveis é feita através do programa AIDA que se constitui em um Sistema Especialista Neuro-Fuzzy. O programa AIDA, cujo esquema ilustrativo de utilização é mostrado na Figura 1, interage dinamicamente com o banco de dados da empresa concessionária, onde estão armazenados e continuamente atualizados dados de cromatografia, parâmetros físico-químicos, históricos e descrições de ocorrências notórias, entre outros.



**FIGURA 1**  
Esquema Geral do Sistema SID

## 2.0 - MÓDULOS DO PROGRAMA AIDA

O Programa AIDA contempla uma estrutura modular de análise e diagnósticos, conforme tela gráfica da Figura 2. O usuário pode selecionar AGD (Análise dos Gases Dissolvidos no Óleo), GP2FAL (Modelo CEPEL de correlação do Grau de Polimerização do Papel, GP, com o teor de 2-Furfuraldeído e a perda de vida percentual do transformador) e Carregamento (Módulo de análise da perda de vida em função do nível de carregamento atual e do comprometimento da vida pelo histórico de operação da unidade).



FIGURA 2

Escolha de opção para análise pelo programa AIDA

## 3.0 - MÓDULO AGD

Escolhida a opção AGD o programa imediatamente acessa a base de dados da concessionária contendo o histórico de gás cromatografia do transformador monitorado (ou sob análise), conforme Figura 3 abaixo.

	Data anterior	Data recente	Valores Limite
H2	11/25/93	9/2/94	138.2
O2	11970	11163	19512.7
N2	61909	66622	85107.6
CH4	46	312	34.7
CO	591	732	707.3
CO2	2666	4107	5948.6
C2H4	16	78	51.2
C2H4	74	373	18.1
C2H2	0	1	1.8
C GC	763	1664	973.8
CTG	77308	83556	

FIGURA 3

Tela contendo teores gasosos e indicação de alarme

As datas para a análise e diagnóstico podem ser selecionadas nas duas primeiras colunas, enquanto que a coluna "Valores Limites" contém os valores observados a partir do tratamento estatístico do histórico da "família" de transformadores semelhantes da concessionária, onde família é definida como o conjunto de transformadores de mesmo fabricante, mesmo nível de tensão, mesma potência e projeto. O tratamento estatístico permite utilizar o comportamento histórico como parâmetro de referência, ao invés de usar valores padronizados e controversos para cada tipo de transformador (ex.: transformador com comutador cujo óleo está em contato com tanque principal, transformador selado a gás, etc.). A próxima

tela, Figura 4, permite ao usuário avaliar a taxa de concentração dos gases, em ppm, e sinaliza os níveis anormais (importante entre 10 e 50% ao mês e perigosa acima de 50%). O programa acompanha ainda a evolução do total de gases combustíveis e apresenta a relação típica entre os gases CO<sub>2</sub> e CO, que sabidamente se altera durante a ocorrência de falhas que envolvam a celulose (papel isolante).

% por mês		Gases combustíveis [ ppm ]	
39.14	H2	763	Concentração anterior
-0.72	O2	1664	Concentração posterior
0.81	N2	12.61	Variação [% por mês ]
61.73	CH4		
2.55	CO		
5.77	CO2		
41.37	C2H4		
43.14	C2H6		
-	C2H2		
12.61	C GC		
0.86	CTG		

Classificação [ taxa de geração ]		
Aceitável	Importante	Perigosa
CO C2H2	H2 C2H4 C2H6	CH4

Relação CO<sub>2</sub> / CO para essa família: 26.0

FIGURA 4

Tela contendo informações quanto à taxa de crescimento das concentrações gasosas, dos níveis totais de gases combustíveis e da relação típica entre os gases CO<sub>2</sub>/CO.

A próxima tela, Figura 5, contém um diagnóstico preliminar para a AGD sendo que o usuário encontra alertas e indicações quanto a ocorrências ou alterações em parâmetros fundamentais para o diagnóstico, tais como: taxa de crescimento dos gases combustíveis, concentração dos gases combustíveis, relação CO<sub>2</sub>/CO e indicação das relações gasosas.

Há dois aspectos importantes nesse trecho do programa que merecem destaque. Em primeiro lugar o usuário, ou operador/especialista da empresa concessionária, é chamado a opinar, sendo que sua opinião terá a atribuição de um peso na formação do diagnóstico. O julgamento do especialista é obrigatório e, mesmo que ele não tenha opinião sobre o problema específico, terá que indicar "sem opinião", de modo que o diagnóstico será sempre participativo, conforme exemplo a seguir. Outro aspecto relevante é o diagnóstico preliminar a partir das relações gasosas. Para atingir o diagnóstico preliminar, o programa utiliza um sistema inteligente Neuro-Especialista ou um sistema especialista que busca informações da saída de uma Rede Neural Artificial, Figura 6, treinada para diagnosticar a ocorrência de falhas, a partir das relações gasosas e da interpretação do especialista do CEPEL, sobre o significado da ocorrência daquelas relações gasosas. Partindo das relações apresentadas pela norma IEC 599 (1), a Rede Neural, treinada supervisionadamente conforme descrito em (2), foi capaz de expandir em aproximadamente três vezes o número de possíveis diagnósticos da IEC, produzindo para os casos teste um índice de acerto acima de 95%.

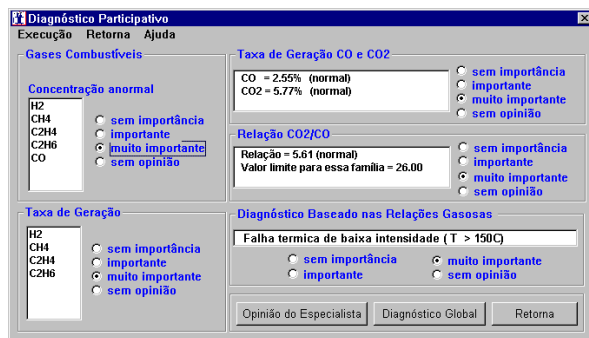


FIGURA 5

Conjunto de pré-diagnósticos a partir dos níveis de concentração, taxa de crescimento e relações gasosas, com julgamento participativo do especialista da empresa.

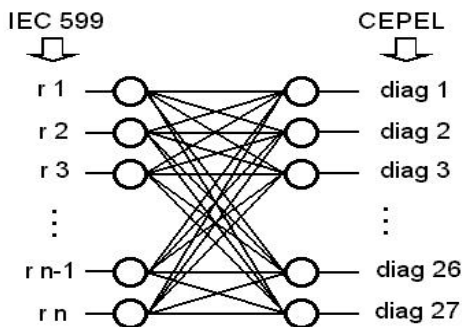


FIGURA 6

Rede Neural Artificial, tipo "feedforward", com treinamento supervisionado, para a obtenção de diagnóstico de falha a partir de relações gasosas padronizadas como entrada.

A próxima etapa contém uma integração dos diagnósticos preliminares, incluindo julgamento do especialista, através de um Sistema Fuzzy de Decisão (3). As variáveis *concentração de gases combustíveis* (NG), *taxa de geração dos gases combustíveis* (TG) e *indicação da rede neural das relações gasosas* (RG) foram definidas em conjuntos fuzzy determinados a partir do sentimento do especialista, conforme ilustrado na Figura 7. Os graus de pertinência de cada parâmetro, em seus respectivos conjuntos fuzzy, foram ponderados pelo julgamento do especialista apresentado na Figura 5. Cada julgamento tem um peso diferente, influenciando de modo diferente o julgamento global, conforme ilustrado a seguir.

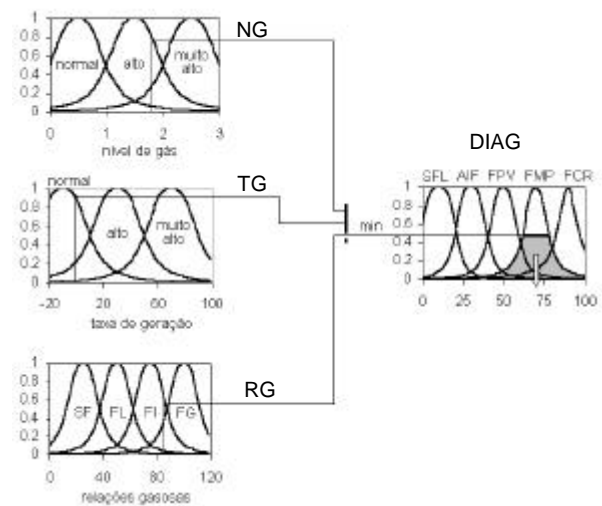


FIGURA 7

Sistema Fuzzy de Decisão utilizando regra de inferência max-min e tendo por variáveis NG (normal, alto, muito alto), TG (normal, alto, muito alto), RG (SF-Sem Falha, FL-Falha Leve, FI-Falha Importante e FG-Falha Grave) e DIAG (SFL-Sem Falha, AIF-Algum Indício de Falha, FPV-Falha Provável, FMP-Falha Muito Provável e FCR-Falha Certa).

O esquema de ponderação considera o peso  $w$ , de cada critério de julgamento do especialista, como sendo aquele suficiente e necessário para alterar o diagnóstico global na direção em que o especialista humano o faria. Assim, por exemplo, uma análise proveniente do critério da Rede Neural Artificial e julgado improcedente pelo especialista humano, teria a atribuição de peso  $w = 0.01$ , enquanto que se julgado muito importante, teria a atribuição de  $w = 3$ . Os pesos atuam como potências nos graus de pertinência dos elementos em seus conjuntos fuzzy, alterando

assim as possíveis correlações de influência no esquema de decisão *fuzzy*.

Tomando-se o caso apresentado nas Figuras. 3 a 5 como exemplo de aplicação para observação do diagnóstico do programa AIDA, a Figura 8 ilustra o julgamento global obtido pelo programa, a partir da consideração de que o especialista julgou "sem importância" todos os diagnósticos preliminares da tela gráfica da Figura 5.

Em outras palavras, supondo que o especialista não compreenda a participação de cada parâmetro no diagnóstico e que tenha inadequadamente julgado sem importância as observações do programa, ainda assim o diagnóstico global seria aquele indicado na Figura 8, de onde se depreende que o conjunto *fuzzy* de maior peso foi o FPV ou Falha Provável, sendo a falha do tipo térmica, com temperaturas desenvolvidas superiores a 150 °C, indicando a presença de um superaquecimento sem, entretanto, indicar envolvimento celulósico).

Se o especialista da concessionária (ou indústria) repensar sua posição e julgar, por exemplo, como sendo muito importante o pré-diagnóstico proveniente do sistema Especialista Neural, que indicou ocorrência de falha térmica, como na Figura 5, então o diagnóstico global se altera conforme Figura 9.

A importância de se permitir ao especialista da empresa a co-autoria do diagnóstico é óbvia e advém do fato de que o especialista humano conhece detalhes da operação, manutenção e funcionamento normal do equipamento que nenhum software é capaz de conhecer ou incorporar, como por exemplo o fato de o especialista saber que foi realizado um determinado tratamento de óleo, naquele transformador específico, e que durante o tratamento, tenha havido hipoteticamente uma contaminação do óleo por CO<sub>2</sub>.

Além disso, repetidamente, programas que utilizam sistemas inteligentes considerados "pacotes fechados", onde são elaborados diagnósticos ou mesmo recomendações de procedimentos, sem interferência direta do ser humano, são vistos com muita reserva pelos especialistas das empresas, mesmo a nível internacional. São inúmeros os casos práticos onde os especialistas se deparam com situações do tipo "sem saída" ou "difíceis de compreender", dada sua experiência. Nesses casos o programa que permite diagnóstico interativo possibilita ao especialista alterar seu próprio julgamento e simular o efeito sobre o diagnóstico global.

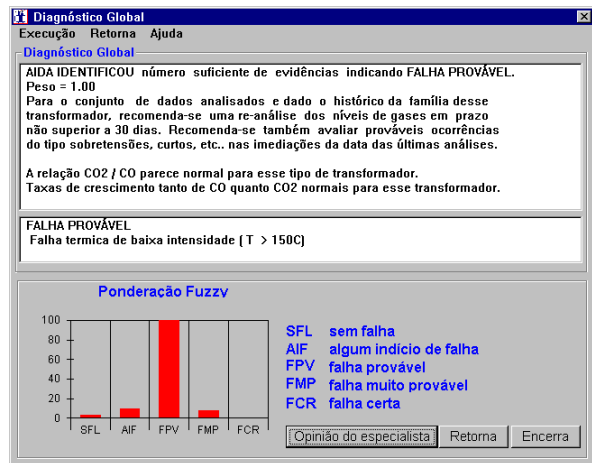


FIGURA 8

Tela gráfica contendo o diagnóstico global do programa AIDA, a partir do julgamento do especialista, considerando os pré-diagnósticos da Figura 5 como "sem importância".

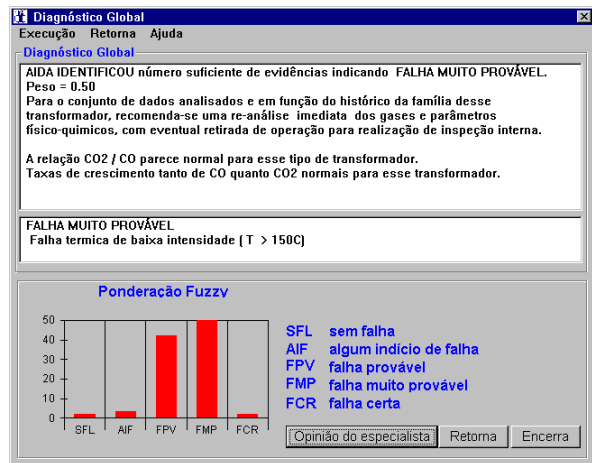


FIGURA 9

Tela gráfica contendo o diagnóstico global do programa AIDA, a partir do julgamento do especialista, considerando os pré-diagnósticos da Figura 5 "sem importância", exceto a indicação da Rede Neural Artificial para as *relações gasosas* (RG) como sendo "muito importante".

No exemplo das Figuras 8 e 9 acima é possível observar graficamente o desvio do centro de gravidade da figura em direção a uma indicação mais firme da presença de falha, na medida em que o especialista escolheu dar maior importância ao diagnóstico da Rede Neural Artificial.

Esse comportamento "intuitivo" do sistema inteligente dá maior confiança ao especialista na tomada de decisão e aumenta sua crença no modelo utilizado como forma de diagnóstico.

#### 4.0 MÓDULO GP2FAL

Este módulo desenvolve uma análise relativa de envelhecimento do transformador com base no modelo CEPEL (4,5) de correlação entre os parâmetros grau de polimerização do papel (GP), conteúdo de 2-Furfuraldeído (2-FAL) no óleo isolante e tempo de operação.

Os gráficos apresentados na Figura 10 ilustram o modo de operação do programa para o caso do transformador monitorado e já analisado nos itens anteriores.

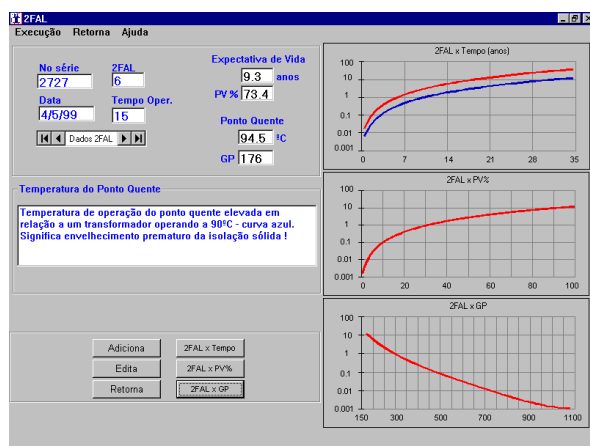


FIGURA 10  
Tela gráfica para o modelo GP2FAL

Conforme dito anteriormente o programa "situa" o transformador em análise em relação a um transformador operando em condições máximas nominais com a temperatura do ponto quente do enrolamento igual a 90 °C. Esta comparação está apresentada nas duas curvas do gráfico superior da Figura 10, onde a curva mais acima representa o transformador monitorado e a curva mais abaixo o transformador de referência. Em outras palavras, o nível de 2-FAL apresentado pelo transformador em 15 anos de operação está bem acima do esperado, indicando um envelhecimento prematuro da isolação sólida, com uma temperatura estimada do ponto quente em 94,5 °C e uma expectativa de vida de menos de 8 anos (vida remanescente). Pelo modelo o GP do ponto quente está muito próximo a condição limite de fim de vida térmica (GP = 150), indicando que o papel está realmente envelhecendo muito rapidamente.

Embora o modelo matemático apresente aproximações e limitações, como discutido em (4), ele deve ser usado, sem dúvida, como uma ferramenta de

comparação e avaliação do comportamento térmico do transformador. Tomando-se duas medidas de 2-FAL, em um período digamos de 1 ano, pode-se avaliar como o transformador se comportou em relação ao último ponto de operação, ou sobre qual curva de operação o transformador estaria trabalhando nesse momento. Deve ser usado como um indicativo a mais do nível de comprometimento da unidade e da expectativa do fim de vida termo-mecânico da isolação sólida do equipamento.

#### 5.0 MÓDULO CARREGAMENTO

Este módulo é o único que depende de variáveis obrigatoriamente monitoradas "on-line", conforme o esquema ilustrativo apresentado na Figura 1. A partir dos valores de tensão, corrente e potência medidos diretamente na unidade monitorada e transmitidas ao programa AIDA através de transdutores e uma remota, e utilizando-se os parâmetros térmicos do equipamento (constantes de tempo térmica, limite de sobrecarga, etc), o programa, a partir do modelo convencional de carregamento da norma NBR5416 (6) permite avaliar o grau de comprometimento da unidade em termos de perda de vida percentual (PV%), relativamente ao transformador de referência utilizado no modelo GP2FAL comentado anteriormente. O módulo de carregamento está em fase de implantação, dependendo apenas da calibração e testes finais nos transdutores de temperatura e corrente por parte da ELETRONORTE. A previsão é que o sistema completo esteja em operação em Junho/99. O exemplo apresentado nas telas gráficas a seguir é hipotético e os dados foram simulados para verificação das rotinas computacionais do programa AIDA.

A produtividade apresentada na Figura 11 é a relação entre a perda de vida percentual acumulada para o transformador monitorado, com base nos parâmetros medidos, e a perda de vida percentual acumulada linear, ou seja, de um transformador operando continuamente com o ponto quente a 90 °C, de modo que a produtividade ideal é de 100% e, quanto mais baixa a produtividade, mais folga tem a unidade e menor o retorno econômico pelo investimento realizado na aquisição do transformador, considerando uma vida estimada de 35 anos.

Baixa produtividade significa que o transformador está sub-utilizado no atendimento à demanda, estando em *crédito* e produtividade acima de 100% significa que o transformador está em *sacrifício* de vida e que seu

envelhecimento é prematuro. Esse parâmetro também pode ser observado pela perda de vida residual, que é a diferença entre a perda de vida de referência e a real.

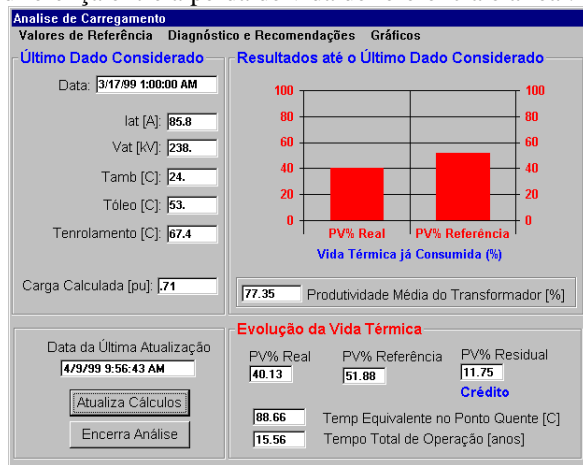


FIGURA 11  
Análise do carregamento

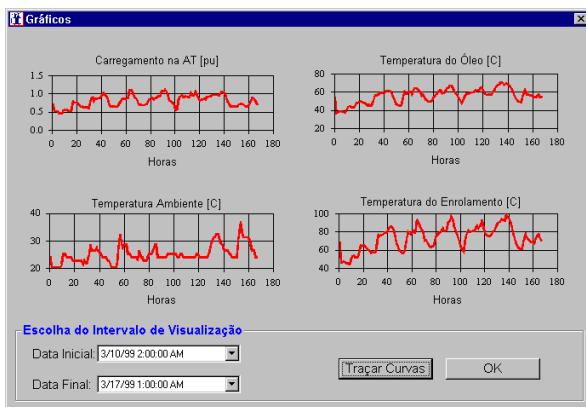


FIGURA 12  
Parâmetros térmicos monitorados e carregamento das últimas 180h.

Esta rotina permite aos engenheiros da operação interagir com o pessoal de engenharia da manutenção no sentido de otimizar o uso do transformador, os intervalos de paradas programadas, os sobrecarregamentos eventuais, etc. Pode-se simular facilmente o efeito da manutenção das condições operativas atuais na produtividade, ao longo de 2h, uma semana, um ano, ou qualquer intervalo de tempo. Além disso, a rotina permite também simular o contrário, ou seja, qual o nível de sobrecarga que o transformador admite para que a produtividade atinja 100% em um ano.

## 6.0 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O sistema inteligente de diagnóstico encontra-se em fase de testes de operação em duas concessionárias

Brasileiras (CHESF e ELETRONORTE) e sua utilização até o momento permite concluir que o monitoramento, em tempo real, de grandezas elétricas e parâmetros de desempenho térmico do transformador, associados ao diagnóstico automático da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo e à avaliação de expectativa de vida com base no carregamento e nos níveis de 2-FAL, são hoje realidade no Brasil. Mais do que isso, 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 (em algumas empresas limitado a um ou dois profissionais), reduz custos, perpetua e multiplica o conhecimento dentro da empresa. A integração do banco de dados da empresa e o tratamento desses dados é um subproduto importante que surge com a utilização do programa AIDA.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC599, Interpretation of the analysis of gases in transformers and other oil-filled electrical equipment in service, 1978.
- (2) Martino, M. B. e de Assis, F., Diagnóstico de transformadores utilizando redes neurais, XIII SNPTEE, Grupo XIII, 1995, Brasil.
- (3) Zadeh L., Fuzzy Sets, Int. Journal of Information and Control, 1965, 338-53.
- (4) Dupont, C. e Cheim, L., Novo Modelo para Avaliação da Vida Remanescente de Transformadores, XIV SNPTEE, Grupo XIII, GEM, 1997, Belém, Brasil.
- (5) Cheim, L., Dupont C. et al, Discussão dos critérios normalizados de perda de vida em transformadores a partir de resultados experimentais de envelhecimento acelerado, XIII SNPTEE, Grupo XIII, 1995, Camboriú, Brasil.
- (6) ABNT, NBR5416, 1981, Brasil.

## 7.0 DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Luiz Cheim nasceu no Rio de Janeiro tendo sido graduado em Engenharia Elétrica em 82 pela UFRJ, obtido o grau de MSc pela COPPE/UFRJ em 87 e o grau de PhD pela University of Nottingham, UK, em 1993. Tem trabalhado como pesquisador do CEPEL desde 1984 e atualmente gerencia projetos de P&D relacionados à qualidade, desempenho e monitoramento *on-line* de transformadores de distribuição e potência, em conjunto com diversas concessionárias Brasileiras.

Tem utilizado recentemente técnicas de inteligência artificial (IA) como ferramentas de análise e diagnóstico do estado operativo dos equipamentos.