

DIEGO ROBERTO MORAIS

**SISTEMA MULTIAGENTE PARA DIAGNÓSTICO INTEGRADO
DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

TESE DE DOUTORADO

Orientação

PROF^a JACQUELINE GISÈLE ROLIM

FLORIANÓPOLIS – 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

SISTEMA MULTIAGENTE PARA DIAGNÓSTICO INTEGRADO
DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Tese submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

DIEGO ROBERTO MORAIS

Florianópolis, Março de 2010.

*Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível,
e de repente você estará fazendo o impossível.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Denia, que esteve sempre ao meu lado, dando-me amor incondicional e incentivo para permanecer nesta longa caminhada.

Ao meu pai, minha mãe e meu irmão, pela força e apoio necessários para prosseguir buscando os meus ideias e minha formação pessoal.

À minha professora orientadora, amiga e madrinha Jacqueline Gisèle Rolim, que confiou na nossa parceria e que, como no mestrado, sempre esteve presente com extrema paciência, compreensão e inteligência, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Zita Almeida Vale do ISEP - Portugal, pela orientação, acolhimento e amizade no período de realização do doutorado sanduíche.

Aos amigos de república, Armando Ortiz Torres, Juliano Ricardo da Silva, Moisés Machado dos Santos e Mateus Felzke Schonardie, pela parceria, companheirismo e por todos os momentos de alegria vividos juntos.

Aos amigos doutorandos, em especial Miguel Moreto e Fernando Prioste.

Aos demais integrantes do LABSPOT – Laboratório de Sistemas de Potência, laboratório este que se transformou por um bom tempo na minha segunda casa.

À ENDESA-CIEN, empresa na qual me orgulho de trabalhar, na figura do Supervisor de Operação, Klinger Gervásio da Silva, por entender e apoiar a minha situação, me liberando quando necessário para chegar ao objetivo final que é esta tese.

A todas as pessoas que de alguma forma ou de outra, me auxiliaram no decorrer destes anos de doutorado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo da Tese de Doutorado apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

SISTEMA MULTIAGENTE PARA DIAGNÓSTICO INTEGRADO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Diego Roberto Morais

Março/2010

Orientadora: Jacqueline Gisèle Rolim.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Monitoramento, Diagnóstico de Falhas, Manutenção, Transformadores, Sistemas Multiagentes.

Número de páginas: 143

RESUMO: No passado, as condições dos transformadores de potência eram acompanhadas com programas de manutenção preventiva executadas de acordo com o tempo, com o transformador fora de serviço. Estas ações eram combinadas com alguns testes que não exigiam o desligamento do transformador e que poderiam ser aplicadas mais frequentemente, como por exemplo a análise dos gases dissolvidos no óleo isolante. Devido ao processo de desregulamentação, as companhias de energia vem tentando reduzir os custos de manutenção e desligamentos para serviços, sem diminuir a confiabilidade e a segurança dos seus sistemas. Para atingir estes objetivos, é necessário o desenvolvimento de melhores ferramentas de monitoramento e diagnóstico para avaliação das condições internas dos transformadores. Antes de analisar o transformador, o especialista de manutenção deve recolher informações apartir dos ensaios e dados históricos de manutenção, sistemas de monitoramento e possivelmente acerca das condições operacionais apartir dos sistemas supervisórios. Estes dados são normalmente encontrados em diversas bases de dados de diferentes departamentos e laboratórios. A proposta contida neste documento apresenta um modelo de sistema multiagente para o diagnóstico integrado de transformadores de potência. Cada um dos agentes desenvolvidos neste trabalho é dotado de alguma inteligência e pode representar um ensaio ou teste realizado com o equipamento. Existem ainda agentes hierarquicamente superiores que lidam com os diagnósticos fornecidos pelos agentes subordinados e que, através de sua inteligência ou um conjunto de regras, alcançam um diagnóstico mais significativo. Esta abordagem visa auxiliar os operadores e especialistas de manutenção, provendo-os com resultados de uma análise inteligente dos dados disponíveis, com diagnóstico mais conclusivo e confiável acerca do estado do transformador, auxiliando na tomada de decisão para agendamento da manutenção.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

MULTIAGENT SYSTEM FOR INTEGRATED DIAGNOSIS OF POWER TRANSFORMERS

Diego Roberto Morais

March/2010

Advisor: Jacqueline Gisèle Rolim.

Area of Concentration: Electric Energy Systems.

Keywords: Monitoring, Fault Diagnosis, Maintenance, Power Transformers, Multiagent Systems.

Number of pages: 143

ABSTRACT: In the past, the condition of power transformers was followed through preventive maintenance programs which required the transformer disconnection and were executed according to a time schedule. These procedures were combined with some tests that did not require the transformer disconnection and could be applied more frequently, for instance the dissolved gas analysis. Due to the deregulation process, energy companies have been trying to reduce maintenance costs and outages for services, without decreasing the reliability and security of their systems. In order to achieve these goals, monitoring tools and diagnostic methods for assessing the internal condition of power transformers should be improved. Usually, before analyzing the status of a transformer, the maintenance specialist has to gather information from historic maintenance tests, monitoring systems and possibly about the equipment's operating conditions from supervisory systems. This data is usually found in several databases of different departments or laboratories. This paper presents a multi-agent system approach for integrated diagnosis of power transformers. Each agent involved in this task has some intelligence and is able to interpret the results of a test executed to evaluate the equipment. Some agents are hierarchically superior and apply their knowledge to handle the conclusions received from its subordinated agents, achieving a more significant diagnosis. This approach aims to assist operators and maintenance personnel, providing them with the results of an intelligent analysis of the available data, with a more conclusive and reliable diagnosis about the transformer state, supporting decisions concerning its maintenance schedule.

SUMÁRIO

1. – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 HISTÓRICO	1
1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	8
1.3 CONCLUSÕES	10
2. – ACOMPANHAMENTO DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA EM SERVIÇO.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.1 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO OFF-LINE/ENERGIZADO	ERROR!
BOOKMARK NOT DEFINED.	
2.1.1 Análise dos Gases Dissolvidos no Óleo Isolante (DGA)	Error! Bookmark not defined.
2.1.1.1 Métodos Convencionais	Error! Bookmark not defined.
2.1.1.2 Métodos baseados em Inteligência Artificial	Error! Bookmark not defined.
2.1.2 Análise Físico-Química do Óleo Isolante	Error! Bookmark not defined.
2.1.2.1 Teor de Água (Umidade)	Error! Bookmark not defined.
2.1.2.2 Rigidez Dielétrica	Error! Bookmark not defined.
2.1.2.3 Tensão Interfacial	Error! Bookmark not defined.
2.1.2.4 Número de Neutralização (Acidez)	Error! Bookmark not defined.
2.1.2.5 Cor	Error! Bookmark not defined.
2.1.2.6 Ponto de Anilina	Error! Bookmark not defined.
2.1.3 Análise Furfural do Óleo Isolante	Error! Bookmark not defined.
2.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO OFF-LINE/DESENERGIZADO	ERROR!
BOOKMARK NOT DEFINED.	
2.2.1 Medição da Tensão de Retorno (RVM)	Error! Bookmark not defined.
2.2.1.1 Procedimento de Ensaio	Error! Bookmark not defined.
2.2.1.2 Limitações e restrições na aplicação do Método	Error! Bookmark not defined.
2.2.1.3 Interpretação do Espectro de Polarização	Error! Bookmark not defined.
2.2.1.4 Conclusões	Error! Bookmark not defined.
2.2.2 Medição das Correntes de Polarização e Despolarização (PDC)	Error! Bookmark not defined.
defined.	
2.2.2.1 Procedimento de Ensaio	Error! Bookmark not defined.
2.2.2.2 Interpretação dos Resultados Obtidos	Error! Bookmark not defined.
2.2.2.3 Vantagens	Error! Bookmark not defined.
2.2.3 Espectroscópio Dielétrico no Domínio da Frequência (FDS) – Tangente Delta (Tan δ)	
Variando na Frequência	Error! Bookmark not defined.
2.2.3.1 Procedimento de Ensaio	Error! Bookmark not defined.
2.2.3.2 Interpretação dos Dados Obtidos	Error! Bookmark not defined.
2.2.4 Análise da Resposta em Frequência (FRA)	Error! Bookmark not defined.
2.2.5 Medida de Descargas Parciais	Error! Bookmark not defined.

2.2.5.1 Medida de Descargas Parciais – Método Elétrico	Error! Bookmark not defined.
2.2.5.2 Medida de Descargas Parciais – Método Acústico	Error! Bookmark not defined.
2.2.6 Grau de Polimerização do Papel	Error! Bookmark not defined.
2.2.7 Resistência de Isolamento	Error! Bookmark not defined.
2.2.7.1 Índice de polarização	Error! Bookmark not defined.
2.2.8 Fator de Potência do Isolamento	Error! Bookmark not defined.
2.2.9 Resistência Elétrica dos Enrolamentos	Error! Bookmark not defined.
2.3 <i>SISTEMAS DE MONITORAMENTO ON-LINE</i>	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
2.3.1 Sistema Hydran 201R	Error! Bookmark not defined.
2.3.2 Aquaoil	Error! Bookmark not defined.
2.4 <i>CONCLUSÕES</i>	Error! Bookmark not defined.

3. – SISTEMAS MULTIAGENTES.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL DISTRIBUÍDA	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.2 AGENTES E SUAS CARACTERÍSTICAS	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.3 RAZÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE AGENTES	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.3.1 Sistemas Abertos	Error! Bookmark not defined.
3.3.2 Sistemas Complexos	Error! Bookmark not defined.
3.3.3 Sistemas Mal-estruturados	Error! Bookmark not defined.
3.3.4 Assistentes	Error! Bookmark not defined.
3.3 SISTEMAS MULTIAGENTES	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.4 CLASSIFICAÇÕES DE AGENTES	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.5 INTERAÇÃO E COMUNICAÇÃO ENTRE OS AGENTES	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.5.1 Linguagem KQML	Error! Bookmark not defined.
3.6 ABORDAGEM PARA “AGENTIFICAÇÃO” DE PROGRAMAS	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.7 TIPOS DE ORGANIZAÇÃO	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.7.1 Organização Hierárquica	Error! Bookmark not defined.
3.7.2 Organização baseada em um Time	Error! Bookmark not defined.
3.7.3 Organização Federada	Error! Bookmark not defined.
3.7.4 Organização baseada em Coalisão	Error! Bookmark not defined.
3.7.5 Organização Composta	Error! Bookmark not defined.
3.8 APLICAÇÕES DE SMA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
3.9 CONCLUSÕES	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>

4. – METODOLOGIA PROPOSTA PARA O DIAGNÓSTICO INTEGRADO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.1 ARQUITETURA DO SISTEMA DITRANS	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
4.2 FORMAS DE DISPARO DA FERRAMENTA	<i>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</i>
4.2.1 Disparo através dos Sistemas de Monitoramento <i>ON-LINE</i>	Error! Bookmark not defined.

4.2.1 Disparo através do Agente <i>Fuzzy</i> Monitor	Error! Bookmark not defined.
4.3 ACESSO AOS BANCOS DE DADOS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.4 CÁLCULO DO GRAU DE CONFIANÇA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.5 CAMADAS DO SISTEMA	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
4.5.1 Camada de Diagnóstico por Critério	Error! Bookmark not defined.
4.5.1.1 Agente Fuzzy	Error! Bookmark not defined.
4.5.1.2 Agente Critério de Doernenburg	Error! Bookmark not defined.
4.5.1.3 Agente Critério de Rogers	Error! Bookmark not defined.
4.5.1.4 Agente Método Previsto na NBR7274	Error! Bookmark not defined.
4.5.1.5 Agente Descargas Parciais – Método Elétrico	Error! Bookmark not defined.
4.5.1.6 Agente Descargas Parciais – Método Acústico	Error! Bookmark not defined.
4.5.2 Camada de Diagnóstico por Método	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.1 Agente 2-fal	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.2 Agente FQ – Análise Físico-Química	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.3 Agente DGA	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.4 Agente RELE – Método de Resistência Elétrica	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.5 Agente RISOL – Método de Resistência do Isolamento	Error! Bookmark not defined.
defined.	
4.5.2.6 Agente FP – Medição do Fator de Potência da Isolação	Error! Bookmark not defined.
defined.	
4.5.2.7 Agente GP – Medição do Grau de Polimerização	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.8 Agente FRA – Análise de Resposta em Frequência	Error! Bookmark not defined.
defined.	
4.5.2.9 Agente DP – Método de Descargas Parciais	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.10 Agente PDC – Medição de Corrente de Polarização e Despolarização	Error!
Bookmark not defined.	
4.5.2.11 Agente $\text{tg}\delta(f)$ – Medição da Tangente Delta em função da Frequência	Error!
Bookmark not defined.	
4.5.2.12 Agente RVM – Medição da Tensão de Retorno	Error! Bookmark not defined.
4.5.3 Camada de Diagnóstico Unificado	Error! Bookmark not defined.
4.5.3.1 Agente Off-Line Desenergizado	Error! Bookmark not defined.
4.5.3.2 Agente Off-Line Energizado	Error! Bookmark not defined.
4.5.4 Camada de Disparo	Error! Bookmark not defined.
4.5.2.1 Agente de Diagnóstico Central	Error! Bookmark not defined.
4.6 CONCLUSÕES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

5. – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

5.1 DIAGNÓSTICO INDIVIDUAL DO TIPO OFF-LINE DESENERGIZADO **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

5.2 DIAGNÓSTICO COMPLETO DO TIPO OFF-LINE DESENERGIZADO **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

5.3 DIAGNÓSTICO INDIVIDUAL DO TIPO OFF-LINE ENERGIZADO *ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.*

5.4 DIAGNÓSTICO COMPLETO DO TIPO OFF-LINE ENERGIZADO *ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.*

5.5 CONCLUSÕES *ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.*

6. – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

.....*ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.*

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS *ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.*

7. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....

ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de Falhas em Transformadores de Potência	2
Figura 2 – Distribuição de Falhas Típicas em Transformadores com Tempo de Serviço entre 15 e 25 anos.....	4
Figura 3 – Percentagem de Falhas em Transformadores de Potência (África do Sul).....	4
Figura 4 - Pressões parciais do equilíbrio térmico de Halstead como função da temperatura.	Error! Bookmark not defined.
Figura 5 - Concentração de Gases Combustíveis em função da Tensão Aplicada (Arco). Error!	Bookmark not defined.
Figura 6 - Triângulo de Duval.	Error! Bookmark not defined.
Figura 7 - Diagrama de Conexões para Transformadores Monofásicos. Error! Bookmark not defined.	
Figura 8 - Testes em Transformador com Terciário.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 9 - Aplicação da tensão U_c para um tempo de carga = t_c	Error! Bookmark not defined.
Figura 10 - Aplicação de curto-circuito com $t_p = \frac{1}{2} t_c$	Error! Bookmark not defined.
Figura 11 - Obtenção da UR (Tensão de Retorno).....	Error! Bookmark not defined.
Figura 12 - Curvas de Tensão de Retorno após os períodos de carga e descarga.	Error! Bookmark not defined.
Figura 13 - Espectro de Polarização e Tensões de Retorno.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 14 - Curvas de equilíbrio de umidade no sistema papel-óleo em função da temperatura.	Error! Bookmark not defined.
Figura 15 - Umidade Relativa como função da constante de tempo dominante e da temperatura do objeto de teste.	Error! Bookmark not defined.
Figura 16 - Efeito do envelhecimento do sistema isolante em transformadores no valor da máxima tensão de retorno.	Error! Bookmark not defined.
Figura 17 - Diagrama de Conexões para Transformadores Monofásicos.	Error! Bookmark not defined.
Figura 18 - Diagrama de Conexões para um Transformador Trifásico. . Error! Bookmark not defined.	
Figura 19 - Circuito básico de medição PDC.	Error! Bookmark not defined.
Figura 20 - Forma de onda das correntes de polarização e despolarização. Error! Bookmark not defined.	

Figura 21 - Influência da umidade do papel..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 22 - Influência da condutividade do papel..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 23 - Umidade no Papel versus condutividade do papel. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 24 - Umidade no Óleo versus condutividade do óleo. ... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 25 - Influência do envelhecimento na corrente de polarização e despolarização.**Error! Bookmark not defined.**

Figura 26 - Correntes de relaxação para amostras de papel envelhecidas como função da tensão de carga. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 27 - Obtenção da Impedância Elétrica. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 28 - Conexão do Sistema IDA à um Transformador de Dois Enrolamentos. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 29 - Variação do Fator de Dissipação em função da frequência e do teor de umidade. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 30 - Variação do Fator de Dissipação em função da frequência e da temperatura. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 31 - Tangente delta medida como função da frequência para quatro diferentes buchas. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 32 – Transformador de 90MVA e 150kV equipado com sensores para medição de descargas parciais..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 33 - Localização dos sensores de DP junto ao tanque do transformador **Error! Bookmark not defined.**

Figura 34 - Percentagem de atenuação dos sinais de potência medidos quando ocorre injeção de potência junto ao sensor S1..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 35 - Localização dos Sensores e Sinais Medidos para o Transformador Testado**Error! Bookmark not defined.**

Figura 36 – Medição de Descargas Parciais **Error! Bookmark not defined.**

Figura 37 – Sistema Hydran 201R..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 38 – Principais Componentes do Transmissor Inteligente**Error! Bookmark not defined.**

Figura 39 – Visualização do AquaOil..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 40 – Agente interagindo com o ambiente..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 41 – Vista canônica de um sistema baseado em agentes**Error! Bookmark not defined.**

Figura 42 – Forma na qual agentes podem coordenar características e atividades **Error! Bookmark not defined.**

Figura 43 – Abordagens para a "agentificação" de programas **Error! Bookmark not defined.**

Figura 44 – Organização Hierárquica **Error! Bookmark not defined.**

Figura 45 – Organização em um Time **Error! Bookmark not defined.**

Figura 46 – Organização Federada **Error! Bookmark not defined.**

Figura 47 – Organização baseada em Coalisção..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 48 – Organização Composta..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 49 – Arquitetura Hierárquica definida para o DITRANSE**Error! Bookmark not defined.**

Figura 50 - Curvas de equilíbrio de umidade no sistema papel-óleo em função da temperatura. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 51 – Fluxo de Troca de Mensagens devido ao Disparo da Ferramenta através do Monitoramento On-Line..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 52 – Pesos Utilizados para o Nível de Gás Gerado Final.....**Error! Bookmark not defined.**

Figura 53 – Conjuntos Fuzzy para Nível de Gás Final referente ao Agente Fuzzy Monitor **Error! Bookmark not defined.**

Figura 54 – Conjuntos Fuzzy para a Taxa de Geração Final referente ao Agente Fuzzy Monitor..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 55 – Operações com os valores de Pertinências dos Conjuntos Fuzzy para o Agente Fuzzy Monitor..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 56 – Fluxo de Troca de Mensagens devido ao Disparo da Ferramenta através do Monitoramento On-Line..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 57 – Exemplo de uma Tabela de Dados integrante dos Bancos de Dados criados **Error! Bookmark not defined.**

Figura 58 – Tabela de Dados de Placa dos Transformadores.. **Error! Bookmark not defined.**

Figura 59 – Conjuntos Fuzzy para o Nível de Gás Final referente ao Agente Fuzzy **Error! Bookmark not defined.**

Figura 60 – Conjuntos Fuzzy para a Taxa de Geração Final referente ao Agente Fuzzy**Error! Bookmark not defined.**

Figura 61 - Operações com os valores de Pertinências dos Conjuntos Fuzzy para o Agente Fuzzy Monitor..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 62 – Gráfico responsável pelo Diagnóstico através de RVM.....**Error! Bookmark not defined.**

Figura 63 – Dados Simulados para o Teste RVM..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 64 – Dados Nominais dos Transformadores Utilizados para o Diagnóstico Através do RVM..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 65 – Diagnóstico por Ensaio do tipo Off-Line Desenergizado para o Transformador 102-00482 nos dias 16/11/2001 e 16/11/2004 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 66 – Diagnóstico por Ensaio do tipo Off-Line Desenergizado para o Transformador 102-00482 nos dias 16/05/2002 e 16/05/2005 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 67 – Diagnóstico Geral do tipo Off-line Desenergizado para o Transformador 102-00482 no dia 16/11/2004 – Parte 1 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 68 – Diagnóstico Geral do tipo Off-line Desenergizado para o Transformador 102-00482 no dia 16/11/2004 – Parte 2..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 69 – Dados reais de DGA para o Transformador 102-00482**Error! Bookmark not defined.**

Figura 70 – Diagnóstico por Ensaio do tipo Off-line Energizado para o Transformador 102-00482 no dia 04/11/2004 – Parte 1..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 71 – Diagnóstico por Ensaio do tipo Off-line Energizado para o Transformador 102-00482 no dia 04/11/2004 – Parte 2..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 72 – Níveis de Geração de Gases para o Transformador 102-00482 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 73 – Bobina da Fase de Média Tensão Avariada **Error! Bookmark not defined.**

Figura 74 – Saída da Ferramenta para Análise do Transformador 102-07000 em 24-09-2004 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 75 – Saída da Ferramenta para Análise do Transformador 102-07000 em 06-10-2004 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 76 – Nível de Geração de Gases **Error! Bookmark not defined.**

Figura 77 – Saída da Ferramenta para Análise do Transformador 102-07000 em 13-10-2004 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 78 – Saída da Ferramenta para Análise do Transformador 102-07000 em 16-10-2004 **Error! Bookmark not defined.**

Figura 79 – Identificação de Deformação e Sinalização do Local onde ocorreu severo Sobreaquecimento **Error! Bookmark not defined.**

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Componentes, defeitos e respectivos métodos de análise</i>	<i>5</i>
<i>Tabela 2 - Correlação entre faltas incipientes e causas em transformadores de potência</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 3 – Guia para identificação da extensão da degradação</i> Error! Bookmark not defined.	
<i>Tabela 4 – Guia para identificação da extensão da degradação</i> Error! Bookmark not defined.	
<i>Tabela 5 – Identificação da condição da isolação através do Índice de Polarização</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tabela 6 – Identificação da condição da isolação através do Fator de Potência.....</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tabela 7 – Exemplos da Influência do Monóxido de Carbono nos Sinais do Hydran</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tabela 8 – Atributos dos Sistemas Multiagentes.....</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 9 – Situações de interações que podem ser geradas.....</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 10 – Comparação de características de vários paradigmas organizacionais.....</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tabela 11 – Efeito da Temperatura na Distribuição de Gases no Óleo [SOKOLOV et al., 2001]</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 12 – Regras estipuladas para o Sistema Fuzzy para o Agente Fuzzy Monitor.....</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tabela 13 – Resposta do Sistema Fuzzy para o Agente Fuzzy Monitor ...</i>	Error! Bookmark not defined.
defined.	
<i>Tabela 14 – Combinação das Saídas para Indicação da Condição do Equipamento no Agente Fuzzy Monitor.....</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 15 – Regras estipuladas para o Sistema Fuzzy para o Agente Fuzzy Monitor.....</i>	Error!
Bookmark not defined.	
<i>Tabela 16 – Resposta do Sistema Fuzzy para o Agente Fuzzy...</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 17 – Combinação das Saídas para Indicação da Condição do Equipamento no Agente Fuzzy.....</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 18 – Critério de Diagnóstico de Falta de Doernenburg</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Tabela 19 – Tabela de Concentração de Gases para Validade do Critério de Doernenburg</i>	Error! Bookmark not defined.
defined.	
<i>Tabela 20 – Tabela de Concentração dos Gases para Validação do Método de Doernenburg</i>	Error! Bookmark not defined.
defined.	

Tabela 21 – Agrupamento de Diagnósticos para o Critério de Doernenburg **Error! Bookmark not defined.**

Tabela 22 – Tabela de Definição dos Códigos do Método de Rogers.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 23 – Tabela de Diagnóstico do Método de Rogers em Função do Código **Error! Bookmark not defined.**

Tabela 24 – Agrupamento de Diagnósticos para o Critério de Doernenburg **Error! Bookmark not defined.**

Tabela 25 – Interpretação da Análise de Gases conforme NBR7274.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 26 – Agrupamento de Diagnósticos para a Normal NBR7274.....**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 27 – Guia para identificação de atividade de Descargas Parciais**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 28 – Guia para identificação da extensão da degradação**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 29 – Guia para identificação da extensão da degradação**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 30 – Limite máximo de Umidade em Óleo Mineral Isolante**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 31 – Regras para determinação do diagnóstico e respectivo Grau de Confiança através do Agente DGA..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabela 32 – Valores de referência para obtenção do Diagnóstico através da Resistência Elétrica..... **Error! Bookmark not defined.**

Tabela 33 – Guia para identificação da extensão da degradação**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 34 – Guia para identificação da extensão da degradação**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 35 – Guia para identificação da extensão da degradação**Error! Bookmark not defined.**

Tabela 36 – Tabela de Diagnóstico Integrado do Agente DP ... **Error! Bookmark not defined.**

Tabela 37 – Faixas de Idades de Transformadores consideradas e Tempos de Carga correspondentes (tc)..... **Error! Bookmark not defined.**

*Tabela 38 – Regras para Decisão no Agente Off-Line Energizado.....***Error! Bookmark not defined.**

*Tabela 39 – Regras para determinação das Ações para o Equipamento em Função do Diagnóstico***Error! Bookmark not defined.**

1. – INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO

Com a desverticalização do setor elétrico e divisão das empresas de energia em setores de transmissão, geração e distribuição, o sistema de transmissão passou a se constituir em um segmento de negócio independente. A remuneração do sistema de transmissão passou a ter uma parte determinada pela disponibilidade dos equipamentos, independentemente de uma eventual indisponibilidade afetar ou não o fornecimento de energia.

No que tange à manutenção neste novo contexto, as alterações ocorrem no sentido de minimizar a indisponibilidade dos equipamentos, seja para ensaios de avaliação das suas condições, seja para intervenção após a atuação de dispositivos de proteção ou sinalização de sistemas de monitoramento *on-line*. Ainda neste sentido, o sistema elétrico nacional possui atualmente um número expressivo de transformadores de potência em operação em diversos estágios de envelhecimento, justificando um maior número de inspeções para se manter a confiabilidade desejada.

Normalmente os transformadores possuem projeto de vida de 20 a 35 anos. Na prática, a vida útil dos transformadores pode ser estendida, desde que submetidos a condições e a programas de manutenções apropriados. Mesmo nestas condições, ou seja, com o envelhecimento normal do transformador, seus componentes internos podem perder parte da capacidade de realizar suas funções, aumentando o risco de falhas. As falhas são normalmente geradas por condições severas tais como transitórios de chaveamentos, curto-circuitos ou outros incidentes. Quando o transformador é novo, ele possui resistência elétrica e mecânica suficiente para resistir às condições anormais de operação do sistema. Com o envelhecimento, sua resistência de isolamento pode decrescer e chegar a níveis que não suportariam tais eventos (WANG et al., 2002).

Um modelo usual do processo de falhas em transformadores de potência é mostrado na Figura 1, (LAPWORTH e MCGRAIL, 1998). Este modelo assume que existe um número de parâmetros, relacionados a forças mecânicas, dielétricas e térmicas, sendo que a falha ocorre quando a força de resistência em relação a um desses parâmetros é excedida pelo *stress* operacional. Nesta figura, a abscissa representa a idade do transformador e a ordenada indica a rigidez e o desgaste. Pode-se observar que a curva de força de resistência possui uma inclinação que vai aumentando com o aumento da idade do transformador. O declive se torna mais

acentuado com a ocorrência de falhas, como indicado pela linha tracejada. Os eventos externos do sistema têm uma participação importante no processo de falhas, seja através da inicialização de uma falha, ou, em condições mais críticas, com baixa força de resistência no momento do evento, ocasionando a diretamente a falha do transformador.

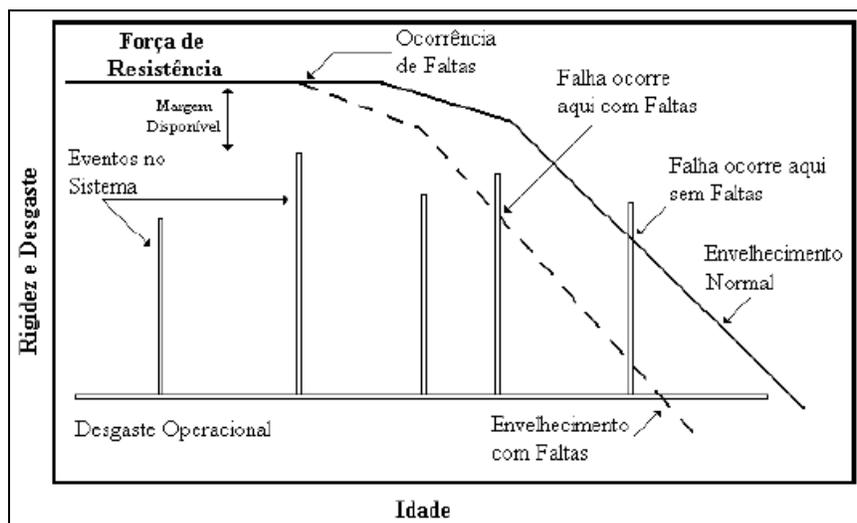


Figura 1 – Modelo de Falhas em Transformadores de Potência

Tradicionalmente, a evolução destas falhas era acompanhada através de programas de manutenção preventiva baseados em testes regulares. Com a desregulamentação, criou-se a necessidade de redução dos custos de manutenção bem como do número de equipamentos indisponíveis. Existe também uma tendência nas concessionárias elétricas de substituir os tradicionais programas de manutenção baseados no tempo por programas de manutenção baseados nas condições, ou seja, ao invés da manutenção em intervalos regulares, ela passa a ser acionada somente quando as condições do equipamento a requerem (WANG et al., 2002). Além disso, após cada manutenção, a vida útil do equipamento tende a ficar deteriorada e assim, seu tempo de operação pode sofrer redução diretamente associada à qualidade da manutenção aplicada, reduzindo o intervalo de falhas do equipamento (LAMBERT-TORRES et al., 2006).

Pela própria alteração do enfoque dado à manutenção, as empresas de energia elétrica vêm investindo em sistemas de monitoramento de transformadores de potência. Existe, contudo, a falta de conhecimento de como transformar as informações fornecidas por estes sistemas em ações efetivas ao equipamento. A combinação de monitoramento *on-line* com avaliações *off-line* provém uma ferramenta útil para a avaliação completa e econômica das condições do transformador, além de reduzir drasticamente o risco de falhas severas (TENBOHLEN et al., 2000). Convém salientar que algumas avaliações *off-line* normalmente realizadas em laboratórios

podem ser efetuadas com o transformador energizado (análise de óleo), mas outras requerem que o transformador esteja desenergizado (normalmente quando o equipamento é enviado para uma manutenção). A quantidade de sistemas de monitoramento e diagnóstico instalados ou o número de equipamentos para ensaios só não é maior devido aos seguintes aspectos (WANG et al., 2002):

- custo: o alto custo para os testes e monitoramento pode tornar difícil a sua justificativa. O preço do equipamento em si pode ser somente um fator limitante, quando comparado ao custo do desligamento da máquina para alguns testes *off-line* ou para a instalação dos equipamentos de monitoramento *on-line*;
- interpretação dos dados: a transformação de dados de testes em informações de diagnóstico, freqüentemente requer a intervenção de especialistas. Interpretações incorretas podem levar a falsas conclusões acerca das condições do transformador;
- confiabilidade: o processo de degradação do transformador pode ocorrer por diversos anos. Os sensores e equipamentos instalados no transformador devem estar aptos a realizar as suas funções por longos períodos com o mínimo de manutenção;
- compatibilidade: a compatibilidade de muitos sistemas de monitoramento *on-line* passou a ser uma preocupação para as concessionárias. Muitos deles são completamente incompatíveis com os desenvolvidos por outros fabricantes.

Mesmo com estes fatores adversos, o desenvolvimento de novos sistemas está crescendo consideravelmente. O problema passa a ser a interpretação de todo este conjunto de variáveis e a obtenção de informações realmente importantes acerca do estado dos transformadores de potência.

Nesta linha, as informações suplementares obtidas pela avaliação *off-line* após a detecção de uma condição anormal são importantes e devem ser integradas em futuros sistemas de monitoramento *on-line* (TENBOHLEN et al., 2000). Além disso, a integração destas técnicas pode fornecer aos especialistas ou engenheiros de manutenção diagnósticos ou indicativos mais seguros de qual o tipo e a severidade do problema que pode estar ocorrendo no equipamento.

Na prática, procedimentos para avaliação de transformadores podem ser executados por algumas das seguintes razões (LAPWORTH et al, 1995):

- monitorar as condições dos transformadores e prover antecipadamente avisos de falhas;
- diagnosticar problemas quando o transformador exhibe sinais de perigo ou seguindo a operação dos equipamentos de proteção;
- determinar se o transformador está em condições de permanecer operando sob condições de operação não-usuais;
- satisfazer os requisitos de segurança;

- obter resultados de referência, auxiliando na interpretação de testes subseqüentes;
- ajudar no planejamento de estratégias de realocação da população transformadora.

Neste contexto, a avaliação das condições dos transformadores de potência está relacionada às condições dos seus componentes principais que asseguram a sua operação normal (SETAYESMEHR et al., 2004). Os componentes principais são o comutador de tensão sob carga (OLTC), buchas, enrolamentos, tanque principal, etc.. Estatísticas de falha de grandes transformadores podem ser benéficas na determinação de qual componente é mais importante na avaliação das condições destes equipamentos. A Figura 2 (WANG et al., 2002) mostra uma distribuição típica das causas de falhas em transformadores com tempo de serviço de 15 a 25 anos. A Figura 3 (MINHAS et al., 1999) mostra também os modos de falha obtidos na África do Sul, a partir do acompanhamento de transformadores de potência, com tensão entre 88 e 765 kV e com potência de 20 a 800 MVA.

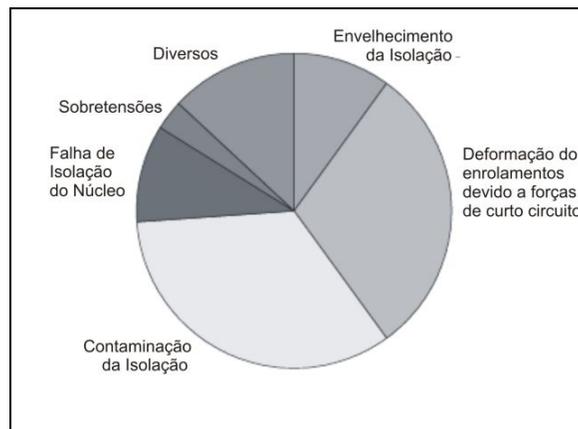


Figura 2 – Distribuição de Falhas Típicas em Transformadores com Tempo de Serviço entre 15 e 25 anos

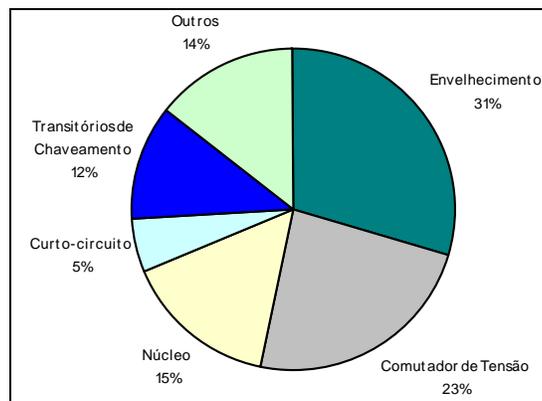


Figura 3 – Percentagem de Falhas em Transformadores de Potência (África do Sul)

Para o desenvolvimento de ferramentas para diagnóstico de transformadores é essencial o levantamento dos principais componentes dos transformadores, os defeitos associados a estes componentes e as possíveis variáveis analisadas para detecção destes defeitos. Este levantamento esteve baseado em diversos artigos acerca do diagnóstico do equipamento e podem ser visualizados, de forma resumida, na Tabela 1.

Nesta tabela nem todos os defeitos e respectivos métodos de análise referentes aos componentes foram considerados. Apenas os mais relevantes foram escolhidos e divididos em função de sua natureza (elétrica, mecânica ou térmica), sendo que na sua maioria são relativos ao sistema de isolamento dos transformadores.

Tabela 1 – Componentes, defeitos e respectivos métodos de análise

COMPONENTES	DEFEITOS	MÉTODOS DE ANÁLISE
OLTC	Problemas nos Contatos	Diferença de temperatura entre o tanque principal e o compartimento do comutador (TENBOHLEN et al., 2000, BENGTTSSON, 1996).
	Problemas Mecânicos	Monitoramento da Corrente do Motor (BENGTTSSON, 1996)
BUCHAS	Umidade	Medição do Fator de Potência (FP) (CHU e LUX, 1999); Medição de Capacitância (C) (CHU e LUX, 1999); Medição do Fator de Dissipação ($\text{tg}\delta$) (CHU e LUX, 1999).
	Descargas Parciais	FP (CHU e LUX, 1999); C (CHU e LUX, 1999); $\text{tg}\delta$ (CHU e LUX, 1999);
ENROLAMENTOS	Sobreaquecimento	Análise de Termografia (WANG et al., 2002); Medição de Resistência Elétrica dos Enrolamentos (HARLOW, 2004; IEEE Std C57.125)
	Perdas elétricas anormais	Medição das Perdas em Carga / Totais (DUPONT, 2005)
	Deslocamento Axial e Radial (Deformação Mecânica)	Análise de Resposta em Freqüência (FRA) (BENGTTSSON, 1996, LAPWORTH et al., 1995, WANG et al., 2002, DUPONT, 2005); Análise de Variação de Indutância (DUPONT, 2005).
	Degradação da Suportabilidade Dielétrica	Medição de Resistência de Isolamento (RI _{sol}) (DUPONT, 2005); Medição do Fator de Potência do Isolamento (FPI _{sol}) (DUPONT, 2005).
	Danos nos condutores	Medida de Resistência Elétrica dos Enrolamentos (WANG et al., 2002).

TANQUE E CONEXÕES	Correntes Circulantes no Tanque	Análise de Emissão Infra-Vermelha (LAPWORTH et al., 1998).
PAPEL ISOLANTE	Umidade	Medição da Tensão de Retorno (RVM) (LAPWORTH et al., 1998); Medição da Corrente de Polarização e Despolarização (PDC) (LAPWORTH et al., 1998); Medição do Fator de Dissipação variando na Frequência ($\text{tg}\delta(f)$) (LAPWORTH et al., 1998); FPIsol. (LAPWORTH et al., 1995); Análise Furfural do óleo isolante (2-fal) (CHU e LUX, 1999, SAHA, 2003).
	Envelhecimento	Grau de Polimerização do papel (GP) (BENGTSSON, 1996, VAN BOLHUIS et al., 2002, DUPONT, 2005); RVM (LAPWORTH et al., 1998, VAN BOLHUIS, et al., 2002); PDC (LAPWORTH et al., 1998); $\text{tg}\delta(f)$ (VAN BOLHUIS et al., 2002); 2-fal (LAPWORTH et al., 1998).
	Descargas Parciais	Medição de Descargas Parciais (DP) (CHU e LUX, 1999); Análise dos Gases Dissolvidos no Óleo Isolante (DGA) (BENGTSSON, 1996).
	Sobreaquecimento	DGA (IEEE C57.104); Análise de Termografia (BENGTSSON, 1996); 2-fal (LAPWORTH et al., 1998).
ÓLEO ISOLANTE	Umidade	Análise Físico-Química do Óleo Isolante (F-Q) (LAPWORTH, 1995).
	Sobreaquecimento	DGA (LAPWORTH et al., 1998; BENGTSSON, 1996); Análise de Termografia (BENGTSSON, 1996).
	Arco Elétrico	DGA (VAN BOLHUIS et al., 2002); F-Q (complementar) (BENGTSSON, 1996).
	Envelhecimento	DGA (VAN BOLHUIS et al., 2002) F-Q (complementar) (BENGTSSON, 1996).
	Descargas Parciais	DGA (LAPWORTH, 1998, DUPONT, 2005; CHU e LUX, 1999); DP (LAPWORTH, 1998, CHU e LUX, 1999); F-Q (complementar) (BENGTSSON, 1996, CHU e LUX, 1999).
ISOLAÇÃO COMO UM TODO	Perdas Dielétricas	$\text{tg}\delta$ (VAN BOLHUIS et al., 2002); FPIsol. (WANG et al., 2002)
	Contaminação	RIsol. (VAN BOLHUIS, 2002); DP (WARD e LINDGREN, 2000).
	Umidade	RIsol. (VAN BOLHUIS, 2002, IEEE Std. C57.125); $\text{tg}\delta(f)$ (VAN BOLHUIS et al., 2002).
	Deterioração	DP (VAN BOLHUIS et al., 2002).
NÚCLEO	Falhas no Núcleo	Medição da Corrente de Magnetização (LAPWORTH, et al., 1998).

A maioria das metodologias listadas na Tabela 1 são amplamente utilizadas nas concessionárias de energia elétrica e têm seus procedimentos de ensaio listados em normas nacionais, como por exemplo, a NBR 7274 e NBR 5380 e internacionais como a IEEE Std C57.104-1991 e IEEE C57.125-1991. Vale salientar que estas normas tratam de ensaios *off-line* do equipamento, sendo que alguns podem ser realizados sem a necessidade de seu desligamento.

Além do maior número de metodologias já desenvolvidas para análise do sistema isolante, as faltas incipientes em transformadores de potência podem ser classificadas em quatro categorias principais: arco elétrico, descargas parciais (corona), sobreaquecimento da celulose e sobreaquecimento do óleo; todas detectáveis através de um ou mais ensaios considerados para a isolação, conforme pode ser verificado na Tabela 2 (WANG, 2000).

Tabela 2 - Correlação entre faltas incipientes e causas em transformadores de potência

CAUSAS	FALTAS			
	ARCO	CORONA	SOBREAQUECIMENTO DA CELULOSE	SOBREAQUECIMENTO DO ÓLEO
Curto-circuito entre espiras nos enrolamentos	X		X	
Enrolamento em aberto	X		X	
Operação do comutador de tensão sob carga	X			
Torção ou deslocamento dos enrolamentos		X	X	
Torção ou deslocamento de terminais		X	X	
Conexão frouxa nos terminais de buchas, conexões de taps e placas terminais	X	X	X	
Água livre ou umidade excessiva no óleo isolante	X	X		
Partículas metálicas flutuantes	X	X		
Conexão frouxa às blindagens corona		X		
Colares, espaçadores, tirante e braçadeiras do núcleo frouxos		X		
Faltas através do equipamento			X	
Sobrecarga			X	X
Isolação danificada dos parafusos do núcleo				X
Ferrugem ou outro dano no núcleo				X
Problemas mecânicos no tanque				X
Caminho de circulação de óleo obstruído				X
Mau funcionamento do sistema de resfriamento				X

Além dos dados armazenados sobre manutenções preventivas e corretivas, os diversos sistemas de monitoramento e diagnóstico de transformadores existentes, aliados aos que estão em desenvolvimento, estão levando ao surgimento das seguintes questões (MCARTHUR e DAVIDSON, 2004):

- o volume de dados a serem interpretados é extenso (dados *on-line* atualizados dinamicamente, históricos referentes a ensaios e testes, etc...), levando os engenheiros a se tornarem inaptos para análise de todo o sistema de potência e identificação de falhas e eventos;
- as fontes de dados estão dispersas na rede e em itens da planta elétrica (sistemas de monitoramento *on-line* com dados disponíveis nos sistemas supervisórios, bases de dados de ensaios localizadas em laboratórios físico-químicos, laboratórios de alta e baixa tensão), levando a questões de telecomunicações significantes e problemas de processamento e interpretação distribuída;
- diversas fontes de dados podem necessitar de integração e interpretação para prover diagnósticos reais de alguns problemas (por exemplo: dados do SCADA, dados de carga, resultados de DGA, resultados de análises de gases *on-line* e outros valores resultantes do monitoramento de transformadores); e
- fontes de dados adicionais poderiam ser consideradas no futuro nas funções de monitoramento das condições e diagnóstico.

Para esta problemática, os sistemas multiagente surgem como uma alternativa de solução, sendo capazes de trabalhar com grande volume de dados, convertendo estes dados em informações úteis, suprindo pessoal apropriado com informações corretas e no tempo certo. Além disso, sistemas multiagentes proporcionam flexibilidade, permitindo que novos dados e sistemas de monitoramento sejam incorporados no futuro (MCARTHUR e DAVIDSON, 2004).

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Este documento está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo uma breve introdução ao problema do diagnóstico de transformadores de potência é apresentada. No capítulo 2 são apresentadas as diversas técnicas para acompanhamento dos transformadores em serviço, abrangendo sistemas de monitoramento *on-line* e ensaios para avaliação *off-line* comumente realizados em laboratórios de alta e baixa tensão.

No capítulo 3 é apresentada uma introdução aos Sistemas Multiagentes (SMAs), trazendo a conceituação destes, aspectos de sua organização, comunicação e classificação. São também apresentadas algumas aplicações destes sistemas a sistemas de potência e a justificativa para sua

aplicação ao problema aqui abordado. Com base no capítulo 3 e no conjunto de técnicas apresentadas para acompanhamento de transformadores no capítulo 2, o capítulo 4 apresenta detalhes da topologia do SMA implementado, bem como a descrição de todas as metodologias consideradas nesta tese para o diagnóstico integrado de transformadores. Os resultados obtidos com a utilização do sistema a casos reais e simulados de transformadores de potência são apresentados no capítulo 5. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões advindas do desenvolvimento do trabalho e sugestões para sua continuidade.

De forma resumida, os seguintes passos foram seguidos no desenvolvimento desta tese de doutorado:

- levantamento e estudo detalhado dos principais ensaios e técnicas de diagnóstico aplicados a transformadores de potência citados na Tabela 1, listando as considerações acerca de cada teste, as grandezas envolvidas e as possíveis faltas que estes podem identificar;
- estudo e levantamento das principais características da técnica de inteligência artificial escolhida para o desenvolvimento deste trabalho que consiste nos sistemas multiagentes, e aplicações desta em problemas semelhantes e em demais áreas dos sistemas elétricos de potência;
- desenvolvimento de módulos computacionais individuais de diagnóstico para cada uma das técnicas estudadas na etapa anterior, baseando-se em:
 - utilização de técnicas de inteligência artificial para o diagnóstico como lógica *fuzzy* e sistemas baseados em regras, como as já implementadas em MORAIS (2004);
 - utilização de modelos matemáticos para comparação de dados de ensaios atuais com dados históricos e avaliação de tendências;
 - utilização de modelos matemáticos para obtenção de diagnósticos através da comparação dos valores obtidos em determinados ensaios com valores referenciados em normas ou amplamente publicados em literatura específica;
- desenvolvimento da abordagem multiagente para o diagnóstico integrado de transformadores de potência, considerando a existência de sistemas de monitoramento *on-line*, ensaios e técnicas de diagnóstico *off-line*, com o equipamento energizado e desenergizado;
- desenvolvimento desta abordagem multiagente considerando a distribuição física das informações pertinentes a cada equipamento e aproveitando o necessário das bases de dados de transformadores de potência e dos módulos individuais implementados na segunda etapa descrita acima.

De acordo com os passos apresentados anteriormente, a seguinte contribuição foi almejada no desenvolvimento deste trabalho: proposta e avaliação de uma metodologia para diagnóstico integrado de transformadores considerando informações resultantes de diversos ensaios, testes e sistemas de monitoramento, assim como a distribuição destas informações na empresa proprietária do equipamento, visando um diagnóstico confiável, através de uma abordagem inteligente.

1.3 CONCLUSÕES

Este capítulo introduziu o problema de diagnóstico de transformadores de potência, apresentando algumas estatísticas de falhas, juntamente com uma divisão do equipamento em componentes principais, listando seus defeitos e grandezas que podem ser avaliadas. Este estudo mostra a importância de integração de metodologias, já que para um defeito podem existir vários métodos de diagnóstico associados.

A importância da integração de técnicas de monitoramento *on-line* com sistemas de diagnóstico *off-line* tornou-se um objetivo a ser buscado pelas concessionárias de energia elétrica, principalmente após a desverticalização do setor. As multas impostas pela indisponibilidade dos equipamentos é fator preponderante no faturamento de uma empresa.

Apesar dos dispositivos de proteção, do monitoramento *on-line* e dos procedimentos adotados na manutenção preventiva de transformadores, falhas catastróficas continuam ocorrendo. Dados apresentados no Workshop de Transformadores (2003) mostram que a cada cinco horas de desligamento forçado de um transformador perde-se o seu faturamento mensal.

Além disso, a própria distribuição física das informações advindas dos sistemas de monitoramento e bancos de dados de manutenção dificultam a identificação da falta que possa estar ocorrendo de maneira segura e confiável.