

# 1 Introdução

## 1.1. Motivação

O sistema elétrico brasileiro consiste em um complexo conjunto de usinas geradoras, estações, linhas de transmissão e inúmeros sistemas de distribuição, dos mais diversos tipos e características que, interligados entre si, formam uma imensa rede que contempla grande parte da demanda nacional de energia elétrica. Cada vez mais, por razões econômicas que envolvem o mundo globalizado, o setor de energia torna-se mais competitivo em busca de mercados e na permanência nos mesmos, uma vez que os agentes de regulação e operação impõem índices de confiabilidade e de disponibilidade sobre os sistemas e equipamentos.

Com a desverticalização do setor e sua reestruturação, a busca pela otimização de receitas, frente à minimização do emprego de recursos, tem sido a regra geral de todas as empresas que estão inseridas em mercados competitivos. Portanto, para atender ao paradigma de máxima confiabilidade e disponibilidade a custos reduzidos, alguns conceitos surgem à tona na gestão das empresas (ABRATE, 2008).

Com a mudança de filosofia do setor elétrico, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), além de suas questões regulatórias já intrínsecas, tem estimulado a modicidade tarifária nos sistemas de transmissão através da inserção de investidores privados, incentivando com isso o ambiente de ampla concorrência entre os agentes. Outra recente questão que afetou diretamente todas as empresas do setor foi a homologação e posterior promulgação pela ANEEL da Resolução Normativa N° 270/07, que estabelece as disposições relativas à qualidade dos serviços de transmissão associadas à disponibilidade das instalações da rede básica, a chamada “parcela variável” (ABRATE, 2008).

Antes da homologação, os agentes tinham seus desligamentos e intervenções para fins de manutenção apenas limitados pelo Operador Nacional

do Sistema (ONS), devido a questões sistêmicas. Uma vez aprovada a intervenção, o agente poderia realizar qualquer manutenção sem qualquer prejuízo financeiro, até mesmo em situações de falha sem efeitos maiores ao sistema interligado. Com a promulgação, todos os ativos, licitados ou não, passaram a estar sujeitos a penalizações por indisponibilidade, estabelecendo descontos por desligamentos programados, desligamentos decorrentes de falhas e definindo limites de tempo para as interrupções. Desta forma, o conceito sobre a gestão de ativos ganhou força e papel estratégico dentro das empresas de energia (ABRATE, 2008).

Considerando que a boa gestão dos equipamentos e instalações passa pela boa administração durante a aquisição, manutenção, operação e o próprio descarte dos mesmos, tais atividades tornam-se fundamentais para a saúde administrativa das empresas neste novo contexto.

A natureza dos sistemas elétricos sugere grande complexidade, pois envolve diversas tecnologias, equipamentos de diferentes fabricantes, além de filosofias de trabalho que diferem de uma empresa para outra. Considerando em especial a área de equipamentos elétricos de potência, um dos ativos de maior preocupação dos setores de manutenção, dada a sua importância nos sistemas elétricos em todos os segmentos, é o transformador. Além disto, a substituição de um equipamento de tamanha complexidade, não ocorre de forma imediata, pois exige grande logística operacional das empresas além de muita experiência em manutenção e comissionamentos.

Como os transformadores de potência são os equipamentos mais caros e críticos em plantas elétricas, é exigido grande esforço das empresas para garantir a integridade operacional dos mesmos ao longo do seu ciclo natural de vida útil.

Entre as consequências diretas das falhas em transformadores, destacam-se os prejuízos financeiros de confiabilidade e indisponibilidade já citados, a interrupção do fornecimento de energia a consumidores de diversas naturezas, além do efeito direto que as chamadas “falhas catastróficas”, como as explosões, podem acarretar a outros equipamentos adjacentes e sobretudo os riscos ao meio ambiente e à integridade física de trabalhadores (CIGRÉ, 2006). Vale lembrar a diferença conceitual entre falhas e faltas: no primeiro caso o equipamento sai de operação e não realiza a sua função básica; no caso das faltas, o equipamento

ainda opera, porém com deficiências de desempenho que podem evoluir para uma falha.

De acordo com as características técnicas e o contexto operacional em que o transformador de potência está inserido, metodologias de diagnóstico e técnicas de monitoramento têm sido aplicadas na detecção de possíveis processos de falhas. Entre as metodologias de diagnóstico, amplamente difundidas e aceitas não somente no Brasil como no setor elétrico mundial, a Análise de Gases Dissolvidos (AGD) destaca-se como uma das mais importantes quando considerados transformadores de potência (BATES, 2006).

Os transformadores de grande porte, em sua maioria, utilizam o Óleo Mineral Isolante (OMI) de base naftênica (ASSIS FILHO, F., 2000), em razão das suas propriedades dielétricas quanto à isolação e refrigerantes como agente de transferência de calor. Portanto, avaliar a condição operativa de um transformador de potência e a possibilidade de evolução de faltas, significa em grande parte monitorar e avaliar as condições de sua isolação sólida e líquida.

Buscando cada vez mais evitar os prejuízos decorrentes de intervenções desnecessárias em transformadores de potência e, ao mesmo tempo, não permitir que as faltas evoluam para níveis de risco aos padrões de confiabilidade e disponibilidade atualmente exigidos, as empresas do setor elétrico têm investido de forma intensa em soluções tecnológicas que indiquem o estado real dos equipamentos, sobretudo dos transformadores de potência, para programar intervenções somente no tempo ótimo, ou pelo menos após a constatação de que alguns parâmetros de controle e variáveis já atingiram valores críticos ao equipamento.

Para oferecer suporte à tomada de decisão sobre a intervenção nos equipamentos, sobretudo em transformadores de potência, os atuais sistemas de monitoramento adotados pelas empresas consistem basicamente em um conjunto de sensores adaptados em diversos pontos do equipamento que, por meio de transdutores, convertem sinais analógicos em digitais e indicam as medições de diversas grandezas e parâmetros de importância para a avaliação das condições operacionais do transformador (SCARDAZZI, 2008). Os cálculos destas grandezas são efetuados através de processadores e os softwares permitem o acesso a informações pelo usuário, assim como o tratamento dos dados. A Figura 1 apresenta alguns dos pontos de monitoramento em transformadores de potência.

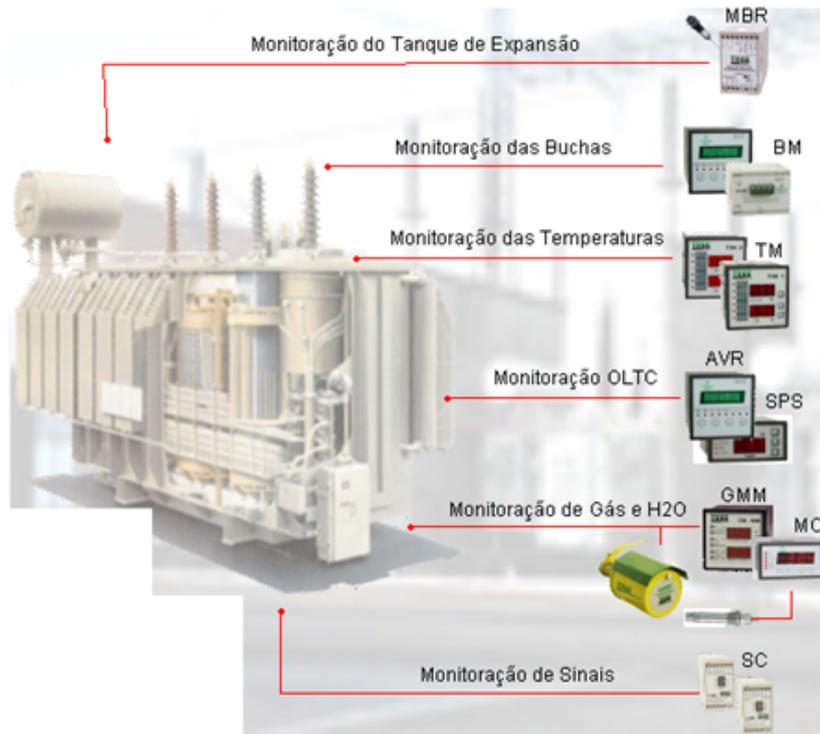


Figura 1 – Exemplo de sistema de Monitoramento

Fonte: TREETECH (2006)

Atualmente, muitos sistemas de monitoramento têm sido desenvolvidos pelos grandes fabricantes de equipamentos para que o funcionamento de transformadores possa ser acompanhado em tempo real por técnicos e especialistas, além de fornecer subsídios ao diagnóstico. Outras empresas mais criteriosas e conservadoras em relação a investimentos e com equipes de manutenção, preferem utilizar apenas sensores instalados em pontos que julgam ser críticos ao transformador, evitando soluções técnicas de alto custo e sem a avaliação precisa do retorno do investimento (BARROS FILHO, V.N.A., 2003). Desta forma, os fabricantes dos chamados “pacotes de monitoramento”, têm oferecido sistemas e soluções a custos mais baixos para tornar seus produtos mais acessíveis e atrativos.

Mesmo que a tecnologia de sensores e de softwares evolua de forma crescente, mais do que monitorar, a grande questão que envolve a segurança das instalações e equipamentos consiste na capacidade de tomar decisões quanto às possíveis intervenções nas instalações de forma otimizada considerando aspectos estratégicos, técnicos e econômicos.

Os sistemas de apoio à decisão (SAD), são sistemas interativos que proporcionam ao usuário um acesso fácil a dados e modelos decisórios para auxiliar atividades de tomada de decisão semi-estruturadas ou não-estruturadas. Seja utilizando ferramentas estatísticas ou técnicas de inteligência computacional (IC), os SAD estão ganhando mercado em problemas de natureza não linear e com diversos de parâmetros e variáveis a considerar, tipicamente encontrados em questões relacionadas ao setor de energia elétrica. Assim, técnicas como redes neurais artificiais (RNA), lógica fuzzy (LF) e sistemas híbridos, – sistemas neurofuzzy (SNF), por exemplo – têm sido amplamente empregadas em problemas de classificação de padrões adaptados para o diagnóstico de equipamentos (ARANTES, J.G., 2005).

Destacando a AGD pela sua aceitação mundial e grande potencial no diagnóstico de faltas, a grande maioria das técnicas de (IC) utiliza dados desta ferramenta para estabelecer uma relação causal entre os dados de entrada e o diagnóstico dos equipamentos.

Apesar das RNA serem mais freqüentemente aplicadas em problemas de diagnóstico, elas apresentam algumas desvantagens nesta área. Na maioria das aplicações, necessita-se de dados de um volume considerável e preferencialmente reais para que a rede neural apresente um bom desempenho, fator este quase sempre indisponível pelas equipes de manutenção nas empresas. Outro ponto a destacar é que as RNA são “caixas pretas” (RAMOS, 1999), isto é, não fornecem de forma explícita a relação entre as variáveis de entrada e a saída. No caso de transformadores, por exemplo, isto dificulta a compreensão da natureza do fenômeno de formação de gases.

Os Sistemas Neuro-Fuzzy, apesar de se constituírem em ferramentas poderosas em sistemas que envolvem fenômenos não-lineares (JANG, 1993), na maioria das aplicações, sistemas fuzzy do tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK), nos quais o conseqüente é apresentado sob a forma de uma função. Esta formulação não fornece resultados interpretáveis (linguisticamente), o que seria desejável no diagnóstico de equipamentos elétricos.

Com um menor número de aplicações, porém com uma filosofia atrativa em problemas de diagnóstico de equipamentos, os Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF) (ROSS, 1995) podem ser especialmente úteis no diagnóstico de faltas em transformadores pela AGD (MIRANDA, 2005). Considerando as inconsistências

apresentadas pelos critérios tradicionais de AGD existentes, os SIF constituem-se em uma ferramenta capaz de, por meio de regras inseridas por especialistas ou extraídas de bases de dados, aperfeiçoar aqueles que apresentam baixo desempenho.

A proposta de elaboração de um SIF que utilize uma metodologia de extração de regras de forma automática a partir de uma base de dados de AGD no óleo isolante de transformadores - que posteriormente foram inspecionados e com o diagnóstico comprovado, torna a aplicação singular tanto em termos de desempenho quanto na forma da apresentação dos resultados: por meio de regras explícitas que relacionam os gases e os padrões de diagnóstico, tem-se, ao contrário das RNA, uma melhor compreensão da natureza do fenômeno e uma apresentação do conhecimento obtido de forma clara e acessível aos usuários.

Estabelecer um sistema capaz de obter um bom desempenho de diagnóstico e que ao mesmo tempo forneça aos gestores de manutenção subsídios para a tomada de decisões sobre os transformadores de potência, considerando suas particularidades de projeto e o contexto operacional nos quais estão inseridos, torna a idéia de unir a inteligência computacional com o conhecimento do especialista muito útil e aplicável nos setores de gestão das empresas do setor elétrico (ARANTES, J.G., 2005). Em termos práticos, a utilização de um módulo de suporte, com recomendações e ações para a manutenção dos transformadores, baseado no diagnóstico oferecido por um SIF, torna o processo de tomada de decisão sobre a manutenção dos equipamentos muito mais completa e próxima do cotidiano das empresas de energia elétrica.

## **1.2. Objetivos do Trabalho**

O objetivo principal deste trabalho é propor e desenvolver um Sistema de Apoio à Decisão, denominado SADTRAFOS, para o diagnóstico de transformadores de potência. Este sistema é composto por três módulos: (i) módulo de pré-processamento dos dados de AGD e definição das entradas do SIF, (ii) SIF, que utiliza uma base de dados reais de AGD no OMI de transformadores inspecionados para extração automática de regras e formulação do diagnóstico e (iii) módulo de suporte à decisão que, através do diagnóstico indicado pelo SIF,

apresentará recomendações mais completas sobre o equipamento e ações direcionadas à gestão de manutenção dos transformadores.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

O trabalho é estruturado basicamente em cinco etapas, conforme segue:

- Revisão Bibliográfica – compreende a pesquisa bibliográfica sobre os transformadores de potência, a identificação dos seus principais sistemas e componentes e o estado da arte no diagnóstico dos mesmos.
- A Análise de Gases Dissolvidos (AGD) Aplicada no Diagnóstico de Transformadores de Potência – considerada por muitos especialistas como a ferramenta de maior recurso na avaliação das condições operacionais dos transformadores de potência, a AGD foi apresentada e amplamente discutida em relação aos critérios tradicionais de diagnóstico utilizados para identificar os processos de falha em transformadores. Além disso, aborda-se o avanço tecnológico da técnica com os sistemas de monitoramento on-line de gases dissolvidos no OMI e a utilização de técnicas de inteligência computacional, sobretudo a lógica fuzzy em problemas de classificação de padrões ou diagnóstico de equipamentos.
- Sistema de Apoio à Decisão (SADTRAFOS) – apresenta-se o sistema de apoio à decisão aplicado no diagnóstico de transformadores denominado por SADTRAFOS e os seus três módulos: (i) pré-processamento da base de dados com a limpeza de dados, a normalização dos valores obtidos com a AGD no óleo isolante dos transformadores e a separação destes dados através do respectivo diagnóstico observado durante as inspeções, e seleção de variáveis utilizando métodos tais como PCA (*Principal Components Analysis*) e LSE (*Least Square Estimator*) além do conhecimento especialista; (ii) SIF, com regras obtidas de base de dados reais de transformadores inspecionados, (iii) ações e recomendações quanto a manutenção dos transformadores, considerando suas particularidades de projeto e o contexto operacional, utilizando o conhecimento de especialistas e levando em conta o diagnóstico apresentado pelo segundo módulo. Desta forma, o modelo SADTRAFOS

indica, além do diagnóstico do transformador, sugestões para a tomada de decisão aos gestores de manutenção.

- Estudo de Caso – relata-se todo o processo de obtenção da base de dados, as etapas do seu pré-processamento, e são apresentados os resultados do estudo realizado sobre os métodos de seleção de variáveis para a definição das variáveis de entrada do SIF no módulo de diagnóstico. Apresentam-se também os resultados obtidos com o software utilizado para a extração das regras do SIF e os respectivos desempenhos de diagnóstico. Para concluir o estudo, discute-se outro caso real de falta em transformador de potência no qual o modelo SADTRAFOS fornece o resultado utilizando os dados de AGD do equipamento além de suas características construtivas e operacionais.

#### **1.4. Organização da Dissertação**

Esta Dissertação está organizada em mais quatro capítulos adicionais, descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta a descrição dos principais sistemas que compõem o transformador e seus principais mecanismos de falha, além do estado da arte no diagnóstico. O capítulo destaca a AGD como uma das principais ferramentas de diagnóstico em transformadores, as principais características e particularidades dos critérios tradicionais de análise e a inovação tecnológica que permeia a AGD em grandes transformadores. O capítulo termina abordando a aplicação de técnicas de IC ao diagnóstico de transformadores e tece considerações sobre a utilização da LF como ferramenta de diagnóstico.

No Capítulo 3 será apresentado a estrutura do SADTRAFOS proposto e seus módulos de pré-processamento, módulo de diagnóstico e o módulo com o conhecimento especialista, que indica, a partir do resultado apresentado pelo SIF, ações e sugestões de manutenção sobre os transformadores, levando em consideração suas particularidades de projeto e contexto operacional.

O Capítulo 4 descreve o estudo de caso realizado neste trabalho, com as considerações sobre a base de dados, as metodologias aplicadas no pré-processamento e os resultados obtidos pelos métodos de seleção de variáveis para

a definição das variáveis de entrada do SIF. Em seguida, o capítulo apresenta o software utilizado para a extração de regras do SIF e os desempenhos obtidos com as simulações. Para avaliar a aplicação do SADTRAFOS proposto, foi realizado um segundo estudo de caso utilizando mais um exemplo real de autotransformador de potência retirado de operação para inspeção e manutenção.

O capítulo 5 finaliza o trabalho apresentando suas conclusões, possíveis contribuições obtidas e propostas de trabalhos e pesquisas posteriores.