

Modelagem de um sistema de apoio à decisão para determinação do regime térmico-operativo de transformadores de potência

Alberto Tamagna¹

Daniel Ferreira²

Jorge Luiz Ferreira³

Luciano Lopes Pfitscher⁴

Resumo

Os transformadores de potência são equipamentos indispensáveis no fornecimento de energia elétrica. Muitas vezes, devido a problemas técnicos e operativos, é necessário que significativos blocos de cargas sejam ligados ao equipamento ou transferidos de um transformador para outro. Para isso, algumas análises devem ser feitas a fim de garantir que o transformador que receberá esta carga adicional não seja submetido a regimes operativos críticos e de risco. A temperatura do óleo do transformador é um dos fatores que devem ser observados para se evitar um dano por sobreaquecimento. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema de apoio às decisões, momentâneas e futuras, sobre o regime térmico-operativo tolerável, conhecendo-se, ou simulando-se duas das três variáveis que mais influenciam o regime em análise: a carga, a temperatura ambiente e a temperatura do óleo isolante-refrigerante.

Palavras-chave: transformadores, modelo térmico, comportamento de temperatura do óleo, simulador.

Abstract

Power Transformers are essential equipment in the electrical energy supply grid. In many situations, due to technical problems, they need to work in overload operation regime or some loading blocks need to be transfers from one transformer to another in emergency situations. In such critical situations, some analysis must be done in order to assure that the transformers won't be damaged. This article presents the development of a decision support system on the tolerable thermal-operative regime, which one requires only two of the three variables that more influences the regime in analysis: the load, the ambient temperature and the insulating oil temperature.

Keywords: transformers, thermal model, behavior of the oil temperature, simulator.

¹ Professor Dr. do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), engenheiro civil, atual diretor da Escola de Engenharia da UFRGS. E-mail: albertotamagna@mecanica.ufrgs.br.

² Engenheiro Eletricista, atua na área de Engenharia de Energia e Gás da PETROBRAS, Rio de Janeiro. Ex-aluno do curso Técnico em Eletrônica da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Viera da Cunha. E-mail: daniel.ferreira@petrobras.com.br.

³ Professor Ms. da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Viera da Cunha, engenheiro mecânico, doutorando do PROMEC-UFRGS. E-mail: jorge.ferreira@terra.com.br.

⁴ Professor Ms. da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), engenheiro eletricista, atual coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da UNISINOS. E-mail: lucianop@unisinoss.br.

1 Introdução

Os transformadores de potência são equipamentos de alto custo e importância essencial em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Em função da potência nominal, geralmente situada entre 10 e 100 MVA, podem ser responsáveis pelo suprimento de energia nos níveis de tensão desejados para conjuntos de pequenas e médias cidades e para bairros ou regiões de grandes cidades. As dificuldades técnicas de substituição, devido ao tamanho e ao peso, à lentidão no transporte, aos elevados custos e à pouca disponibilidade de reservas técnicas, são fatores que, em caso de avaria, provocam imensos transtornos às concessionárias, comprometendo a confiabilidade dos serviços prestados no atendimento aos consumidores e prejuízos econômicos decorrentes.

Freqüentemente, por necessidades técnicas de atendimento a demandas energéticas do sistema ou operacionais, devido a manutenções ou indisponibilidades temporárias, os operadores de sistemas de energia elétrica necessitam transferir grandes blocos de energia entre transformadores de potência. Na maioria dos casos, estas transferências podem originar pequenas ou grandes sobrecargas que podem comprometer a expectativa de “vida útil” dos equipamentos, assim como os colocam em “stress” momentâneo, aumentando a temperatura de trabalho e os riscos de uma pane imediata. Dessa forma, as concessionárias de energia elétrica, assim como as empresas que possuem subestações de grande porte para abastecimento próprio, estabelecem padrões de operação que podem admitir sobrecarregamento dos equipamentos em percentuais aplicáveis à respectiva potência nominal. As concessionárias determinam, ainda, o acompanhamento instrumental da temperatura de trabalho como forma de controle do comprometimento e dos prazos de manutenção. Tal técnica, quando aplicada de forma indiscriminada, sem considerar a “história” da operacionalidade de cada equipamento, pode representar, em alguns casos, situações de subutilização do equipamento ou de risco excessivo para a segurança.

A partir da metade da última década, tem crescido o número de concessionárias que vêm adotando sistemas de automação, monitoramento e controle “on-line” nas subestações transformadoras. Entre os itens monitorados, encontram-se a flutuação das temperaturas de trabalho dos equipamentos de transformação e da carga. Entretanto, por não receberem tratamento matemático adequado, tais informações não têm sido utilizadas como “sistema de apoio à decisão” para simulação de limites e regimes operativos dos equipamentos monitorados.

A proposta deste artigo é apresentar, sinteticamente, os resultados obtidos com o desenvolvimento e aplicação de um modelo que, a partir das informações coletadas por um sistema de aquisição de dados, permite apoiar decisões sobre a operação e a transferência de blocos de carga acima da potência nominal, tratando de forma individualizada cada equipamento, seu histórico operacional, possibilitando simulações futuras e verificação da influência na curva de comprometimento da “vida útil”.

O objetivo final do desenvolvimento do sistema foi a elaboração de um algoritmo responsável pela modelagem do comportamento térmico do transformador em estudo, através da técnica estatística baseada na regressão linear a duas variáveis, descrevendo ou simulando uma terceira, utilizando para tal os dados obtidos através de sistemas de aquisição e dados em operação, os quais apresentam resultados comportamentais do equipamento, com bom nível de confiabilidade, permitindo a simulação on-line ou através de ábacos gerados a partir da equação que modela o regime térmico-operativo do equipamento.

Parte da sua fundamentação teórica, bem como dos resultados experimentais foi obtida através do trabalho desenvolvido pelo engenheiro Daniel Ferreira, do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS e seu orientador, Professor Ms. Luciano Lopes Pfitscher, relativo à monografia de conclusão de curso, com o projeto “SimTrans – Simulador Térmico para Transformadores de Potência” (FERREIRA, 2004). Relativamente aos parâmetros de funcionamento das

subestações transformadores de grande potência, da metodologia matemática para construção do modelo e do tratamento dos dados adquiridos, bem como da influência, importância e aplicação do estudo para a operação em sistemas de potência, o trabalho foi coordenado pelo Professor Ms. Jorge Luiz Ferreira, da Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Viera da Cunha, como parte integrante da validação da metodologia a ser utilizada na pesquisa que desenvolve para obtenção do grau de “Doutor em Engenharia” do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – (PROMEC-UFRGS), sob a orientação do Professor Dr. Alberto Tamagna.

2 Fundamentação teórica do modelo

2.1 Relativamente às perdas térmicas em transformadores

Os transformadores, como qualquer máquina elétrica, possuem perdas associadas às suas características de construção. Segundo Christie (1969), as perdas de energia em um transformador são basicamente divididas entre as perdas no ferro e as perdas no cobre. As perdas no ferro são produzidas pela histerese magnética e pelas correntes parasitas no núcleo magnético, as quais não variam com a carga. As perdas por histerese constituem-se da energia consumida na magnetização e desmagnetização do ferro-silício. Já as perdas por correntes parasitas acontecem devido ao consumo de energia da corrente que é induzida no núcleo de ferro do transformador pela alternância do fluxo magnético que o atravessa.

Conforme Martignoni (1971), as perdas no cobre acontecem devido ao efeito Joule e são causadas pela resistência ôhmica dos enrolamentos primários e secundários do transformador. As perdas no cobre sofrem influência da variação da carga e são proporcionais ao quadrado da corrente que circula nos enrolamentos. As perdas produzidas no ferro e no cobre do transformador são responsáveis pela elevação da temperatura de operação.

Ainda referenciado em Christie (1969), é possível afirmar que os transformadores de pequeno porte não necessitam de métodos especiais de resfriamento. No entanto, devem possuir uma superfície exposta suficientemente grande para que o calor gerado pelas perdas possa ser dissipado, sem que haja uma elevação de temperatura acima dos limites do sistema isolante.

Do desenvolvimento proposto por Martignoni (1971), extrai-se que a elevação da temperatura de um transformador é diretamente proporcional às perdas produzidas e inversamente proporcional à superfície de contato entre esta e o meio ambiente, dependendo também do tipo de material da parte ativa e do fluido refrigerante (óleo). Quanto maior o porte da aplicação, maior a carga, maiores as perdas e, conseqüentemente, maior a temperatura de trabalho de um transformador. Chega-se a um ponto que técnicas especiais de resfriamento devem ser utilizadas.

Normalmente, os componentes da parte ativa dos transformadores (núcleo magnético e bobinados) são instalados no interior de tanques (carcaças) e imersos em fluidos minerais (óleo à base de petróleo) com boas propriedades isolantes e refrigerantes. Ao mesmo tempo em que o óleo aumenta o isolamento do transformador, também atua como meio de troca do calor gerado pelas perdas elétricas. Este resfriamento acontece porque o fluido absorve o calor gerado na parte ativa dos transformadores, o que faz com que sua densidade diminua. Pelo processo da convecção, surge no tanque uma circulação de óleo que absorve o calor da parte ativa e com a circulação periférica troca calor com a superfície interna do tanque, possibilitando a dissipação para o ambiente externo. Para que o calor possa ser retirado da parte ativa do transformador, é preciso que esteja a uma temperatura superior à do óleo que, por sua vez, deve possuir uma temperatura superior à da carcaça, para haver troca de calor. Segundo a norma ABNT 5416 (1997), a temperatura do óleo não deve ultrapassar os 60°C, sob pena de acelerar a oxidação e a degradação do fluido e dos materiais isolantes da parte ativa.

Como a temperatura do óleo de um transformador é resultado das perdas de energia no mesmo, ou seja, perdas no ferro e no cobre, e as perdas no cobre são proporcionais à variação da carga, pode-se ter um acompanhamento do comportamento térmico do transformador monitorando-se a temperatura do líquido isolante. A partir de um histórico de medições, é possível determinar o regime de carga a que o transformador foi submetido e, a partir de um estudo mais profundo, o nível de envelhecimento do fluido e do equipamento.

A publicação de Milasch (1984) apresenta curvas e tabelas de desgaste na resistência mecânica e elétrica dos materiais isolantes empregados em transformadores de potência, com base no número de horas de exposição a determinados níveis de temperatura. Por ser recente a tecnologia de sensoriamento e armazenamento digital através dos sistemas supervisórios instalados nas subestações, esses valores agora podem ser avaliados com excelente nível de precisão, possibilitando avaliação individualizada do regime operativo de cada equipamento.

De outra forma, os métodos de carregamento por aplicação genérica de sobrecargas percentuais, até então muito utilizados, impossibilitam certezas se uma sobrecarga de curta duração de 30% ou 40%, quando a temperatura ambiente externa é baixa, é menos danosa ao equipamento que uma sobrecarga de 5% a 10%, com longa duração, principalmente em regime climático externo de temperaturas elevadas. Ou seja, em princípio, a mesma regra para sobrecargas não pode ser aplicada em equipamentos operando no inverno e no verão, ou em regimes temporários e permanentes.

2.2 Relativamente às técnicas estatísticas de modelagem comportamental

Para que seja possível entender o funcionamento das técnicas estatísticas da modelagem adotada, primeiramente, faz-se necessário compreender o que é um modelo.

Um modelo é a representação de um fenômeno real ou de um determinado sistema. Segundo Silva (2004), os modelos podem

apresentar-se como protótipos ou como modelos matemáticos, os quais podem prestar-se a soluções analíticas, como, por exemplo, é possível citar um modelo de regressão, ou simulação, permitindo assim, reconstituir a rotina funcional de um dado sistema real.

Segundo a metodologia científica, a modelagem prevê as seguintes fases: a criação, a validação e, quando necessário, os ajustes e modificações. O processo só é concluído e considerado válido quando o modelo satisfaz todas as condições previamente desejadas com um nível de confiabilidade pré-estabelecido ou aceitável, conforme Mota Alves (2004).

A partir da análise do texto de Stockburger (1998) é possível afirmar que ao trabalhar com modelos, deve-se levar em conta as seguintes características:

- modelos são necessariamente incompletos: na construção de um modelo são considerados apenas alguns aspectos relevantes que formam a estrutura essencial do sistema em estudo. Ou seja, o modelo é apenas uma representação de um sistema e não o próprio sistema;

- modelos podem ser modificados e manipulados com relativa facilidade: o modelo é fundamental para que um projeto possa ser desenvolvido sem que ocorram prejuízos desnecessários e limitações técnicas não-previstas. Através dos modelos, as modificações no andamento do desenvolvimento de um projeto, por exemplo, não são apenas possíveis, mas podem ser feitas tantas vezes quantas forem necessárias. O modelo deve possuir esta facilidade.

Ainda segundo Mota Alves (2004), a construção de um modelo pode ser dividida em algumas etapas. Primeiro, o sistema a ser modelado deve ser observado. Esta observação pode ser feita tanto com recursos naturais, como, por exemplo, visão, olfato e audição, quanto através de recursos técnicos desenvolvidos para fins específicos, como os diversos tipos de sensores e sistemas de monitoramento existentes. Uma vez que o fenômeno tenha sido observado, parte-se para sua interpretação. Nesta etapa, é feita uma análise sobre a observação para que se possa ter uma melhor noção do sistema em questão e já se visualiza um esboço do modelo

definitivo. Depois, é feita a transformação do modelo, ou seja, são aplicados os ajustes necessários que tornam o modelo mais prático e também mais preciso. Finalmente, realiza-se a verificação do modelo. É nesta hora que os resultados obtidos a partir do modelo são comparados com os resultados observados no sistema real. Se estes resultados forem próximos, pode-se dizer que o modelo é válido. No entanto, se divergirem muito, o modelo ainda não está adequado, e o ciclo de construção deve ser recommçado.

Tipos muito específicos de modelagem são os modelos de regressão. Neste tipo de técnica, também chamada de análise de regressão, a relação entre duas ou mais variáveis são utilizadas de modo que se possa descobrir o comportamento de uma determinada variável a partir das outras. Devido a esta característica explicada por Neter *et al.* (1990), afirma-se que é muito importante saber quais as variáveis que devem ser incluídas na modelagem. A escolha das variáveis certas garante a boa precisão desejada para o modelo. Do mesmo modo, a escolha de uma variável errada dentre todas as variáveis independentes pode invalidar o modelo por completo.

As análises de regressão geralmente são utilizadas para a descrição, o controle e a predição de um fenômeno. Ou seja, através de um modelo de regressão é possível entender o comportamento do sistema (descrição), saber como as variáveis interagem sobre o resultado (controle) e, a partir disto, prever acontecimentos futuros (predição).

Segundo Weisberg (1985), um dos mais importantes usos das técnicas de regressão é na predição do comportamento de um sistema (variável de estudo). Os métodos de regressão se encaixam perfeitamente neste tipo de tarefa, pois a equação que representa o modelo é construída com o objetivo de fornecer um valor esperado na prática a partir dos seus valores de entrada. Ainda segundo Neter *et al.* (1990), a construção de um modelo de predição deve seguir as etapas de aquisição de dados, redução do número de variáveis independentes, ajuste e validação do modelo.

Na etapa de aquisição de dados, todos os dados possíveis de serem medidos são coletados por um sistema específico e confiável. Faz-se então uma análise destes dados e verificam-se, dentre eles, quais os que devem e os que não devem ser descartados. Após, é feita a construção do modelo e seus ajustes, afim de minizar o erro obtido entre a resposta gerada pelo modelo e a resposta do sistema real. Por último, o modelo deve ser comparado com o sistema real para que possa ser feita sua validação a partir de critérios pré-estabelecidos.

A partir desta etapa, é possível promover-se a inserção de outros aspectos (ou variáveis) a serem observados e considerados que possam contribuir para melhor compreensão do fenômeno ou comportamento e que expliquem distorções ou promovam aumento da confiabilidade do modelo e seus resultados.

2.3 Relativamente aos sistemas de aquisição de dados nas subestações

Até um período recente, as informações operativas de uma subestação de transformação davam-se através de meios analógicos, utilizando dispositivos de medição com ponteiros, por exemplo. Praticamente não existiam processos automatizados, sendo que o operador da subestação realizava a leitura nesses instrumentos e controle dos procedimentos necessários ao bom funcionamento. Com a rápida evolução da tecnologia, principalmente com a implantação crescente de sistemas supervisórios “on-line”, o processamento dos dados operativos tornou-se mais volumoso, mais rápido e mais confiável, e o controle manual da subestação pelo operador se tornou secundário, às vezes, até mesmo dispensável, conforme Taylor (1997).

Inicialmente, a “saída” de dados da tensão, da corrente elétrica e das outras grandezas elétricas importantes para avaliação operativa de uma subestação, assim como a grande maioria dos sensores aplicados, era do tipo analógico. Com o passar do tempo, essas informações analógicas começaram a ser convertidas em sinais digitais. Esta mudança foi necessária devido a diversos fatores de ordem técnica,

entre eles, ressalta-se que o custo de sistemas baseados em eletrônica digital e computadores foi e vem sendo reduzido continuamente. Além disso, os sistemas digitais e computacionais conseguem ler muito mais informações em um tempo muito menor. Isso possibilita não só um controle mais preciso como também ações mais rápidas sobre o processo.

Segundo Taylor (1997), os sistemas de aquisição de dados podem ser definidos como sistemas que coletam informações de um número definido de sensores, convertem os sinais lidos para sinais digitais (dados) e transmitem estes dados para computadores, displays ou outros dispositivos eletrônicos que possam processá-los. Os sistemas de aquisição de dados são compostos, basicamente, pelos seguintes elementos (LYNX, 2004): sensores e transdutores; condicionadores de sinais; conversores A/D e D/A; software de aquisição, tratamento e apresentação dos dados.

2.4 Relativamente aos sistemas de apoio à decisão (SAD)

Segundo Sprague e Carlson (1982), os sistemas de apoio à decisão (SAD) podem ser definidos como sistemas computacionais que ajudam os responsáveis pelas tomadas de decisões a enfrentar problemas estruturais através de uma interação direta com modelos de dados e análises. Afirmam que os SAD podem ser divididos em três camadas de hardware e software: SAD específico, gerador de SAD e ferramentas para SAD.

O SAD específico é, na verdade, quem realiza o trabalho. É um sistema de informação, constituído de hardware e/ou software, que permite que um grupo específico responsável pela tomada de decisões lide com um conjunto específico de problemas afins.

O gerador de SAD pode ser visto como um “pacote” de hardware e software que oferece uma série de recursos para a criação de um SAD específico de maneira rápida e simples. A evolução em direção a geradores de SAD alavancou a partir de linguagens de uso específico. A maioria dos sistemas computacionais que poderiam ser utilizados como geradores de SAD estão evoluindo a partir da ampliação de linguagens de planejamento, ou

de linguagens de geração de modelos, contando também com recursos adicionais que possibilitam a elaboração de relatórios específicos e exibição de gráficos explicativos.

As ferramentas para SAD são elementos de hardware ou software que facilitam o desenvolvimento de um SAD específico ou de um gerador de SAD. Esta camada tecnológica tem sofrido enormes avanços, incluindo linguagens de uso específico, melhorias nos sistemas operacionais para possibilitar novas abordagens, como por exemplo sistemas de tempo real.

Conforme Sprague e Watson (1991), a participação no desenvolvimento de um SAD pode ser dividida em cinco categorias:

- o gerente ou usuário é a pessoa responsável por resolver o problema (tomar a decisão);
- o intermediário é um auxiliar do usuário, atuando como operador do sistema ou simplesmente dando sugestões;
- o projetista do SAD é o responsável por customizar o sistema para a realidade que o mesmo se propõe. Essa pessoa deve conhecer muito bem a área na qual o problema está inserido;
- o responsável pelo suporte técnico desenvolve recursos ou componentes adicionais para o SAD como novos bancos de dados, novos modelos de análise, novos formatos para exibição dos dados, quando necessário;
- o desenvolvedor é o responsável pelas novas tecnologias, novas linguagens, novas ferramentas, sempre com a intenção de tornar o sistema mais eficaz.

3 Modelo experimental

A metodologia aplicada para desenvolvimento do modelo experimental constou de duas etapas: a modelagem preliminar de teste utilizando aplicativo tipo “planilha eletrônica” (EXCEL) e a modelagem com o uso de software criado especificamente para o sistema.

As variáveis definidas para o modelo foram: temperatura do óleo do transformador, temperatura do ambiente externo ao transformador e potência ativa em kVA (carga). Inicialmente escolheu-se a primeira como

variável dependente (temperatura do óleo) e as duas outras como variáveis independentes. Tal opção tem como justificativa o fato de a operação do equipamento e sua vida útil serem limitadas por um regime térmico de trabalho que mantenha a temperatura do óleo dentro dos parâmetros definidos por norma e pelo fabricante do equipamento. É necessário comentar que a proposta definida para o modelo a ser obtido deve permitir também a alternância entre a forma de dependência entre as variáveis, ou seja, poderá definir a potência ativa tolerada para operação a uma dada temperatura ambiente. Da mesma forma, deverá permitir simular qual a temperatura ambiente tolerável para definidas temperatura do óleo e potência aparente de operação.

3.1 Modelagem experimental de teste

Para a primeira fase de modelagem, cujo principal objetivo era validar a escolha do modelo matemático a ser utilizado, na medida em que se trata de um modelo tridimensional, adotou-se o equacionamento proposto por Silva e Silva (1999, p. 67 a 72) para regressão linear dupla (a duas variáveis independentes) desconsiderando-se resíduos, conforme é apresentado na equação 1.

$$Y = A.x_1 + B.x_2 + C \quad (1)$$

Sendo:

x_1 variável relativa à potência aparente em (independente) [MVA]

x_2 variável relativa à temperatura do ambiente externo (independente) [°C]

y variável relativa à temperatura do óleo (dependente) [°C]

A coeficiente

B coeficiente

C coeficiente

A base de dados foi obtida do sistema supervisão da subestação São Leopoldo, operada pela Concessionária AES Sul, com um transformador marca TRAF0, de 36/48/60 MVA (VN/VF1/VF2) de potência aparente nominal em cada estágio de ventilação e 138 kV/23kV de tensão primária e secundária, respectivamente. Obtiveram-se registros simultâneos da potência real (MW), da potência reativa

(MVAr), da temperatura do óleo (°C) e da temperatura ambiente (°C), a intervalos exatos de 15 minutos, desde às 14h45min do dia 05/06/2003 até às 9h30min do dia 14/06/2003, perfazendo um total de 892 registros de cada grandeza.

A partir de uma planilha EXCEL, calcularam-se e tabelaram-se os valores respectivos para a potência aparente (MVA) e aplicou-se o modelamento para regressão linear dupla proposto na equação 1.

O comportamento dos resultados obtidos para os valores calculados pelo modelo e comparados com os valores da temperatura do óleo medidos pelo sistema supervisão podem ser observados no gráfico da figura 1.

Aplicaram-se as técnicas estatísticas para cálculo da média e do desvio padrão da diferença entre os valores medidos e calculados ($Y - y$), relativos a cada registro, observando-se que 100% destes valores situam-se na faixa entre ± 3 desvios padrões, parâmetro definido por Ribeiro e Caten (2000, p.24) como limites de decisão para validação de um experimento estatístico e por Spiegel *et. al.* (2004, p.206) como dentro da faixa de confiabilidade de 99,73% para um modelo de distribuição de resultados que se comporta conforme a “Curva de Gauss”. Em se tratando de uma modelagem preliminar, dada a resposta estatística e a grande similaridade dos perfis da equação obtida pelo modelo e a curva de valores medidos, tais resultados foram suficientes para as seguintes conclusões:

– para a primeira amostragem de dados o modelo experimental com base no equacionamento matemático da regressão linear a duas variáveis é representativo da grandeza a ser modelada;

– embora não calculado, o nível de confiabilidade do modelo tende a ser elevado numa faixa de tolerância de ± 3 °C de diferença entre o valor real e o modelado, que é menos que 5% dos limites térmico-operativos do óleo usado em transformadores (cerca de 65 °C);

– portanto, é possível prosseguir-se para a fase seguinte do desenvolvimento do modelo adotando-se o mesmo equacionamento matemático de regressão linear tridimensional.

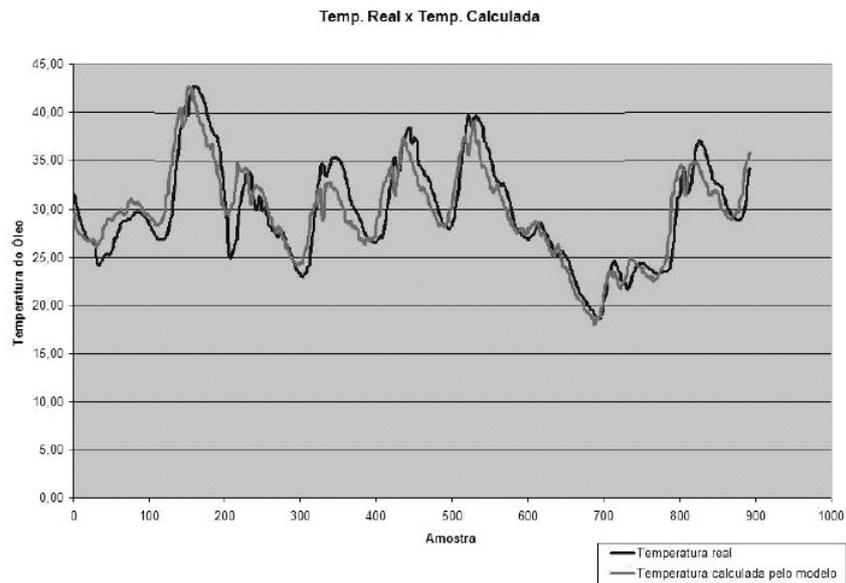


Figura 1 – Gráfico comparativo da temperatura do ambiente medida com a temperatura do ambiente calculada pelo modelo, em °C, relativo ao tempo de cada registro obtido – plotado em EXCEL

3.2 Definição da metodologia

A partir da confirmação do modelo matemático a ser adotado definiu-se a metodologia a ser aplicada nas seguintes etapas:

- coleta de dados de mais subestações e em períodos diferenciados;
- desenvolvimento do algoritmo de aplicação do modelo matemático;
- desenvolvimento do algoritmo de tratamento e validação estatística dos dados;
- desenvolvimento das telas iniciais de interface para o SAD.

O sistema denominado SimTrans compreenderia as 3 últimas etapas da metodologia definida.

4 Desenvolvimento do SAD

Na figura 2, é possível observar um esquemático das etapas que integram o Sistema de apoio à decisão para determinação do regime térmico-operativo de transformadores de potência (SAD) previsto no experimento.



Figura 2 – Representação esquemática do SAD

Os principais componentes do Sistema de aquisição de dados em uso pelas concessionárias AES Sul e RGE, operadoras das subestações que forneceram a base de dados que possibilitaram o desenvolvimento do SAD, podem ser descritos e definidos pelas seguintes siglas:

- COS (Centro de Operação do Sistema), a central ou regional responsável pela operação do sistema de potência da concessionária, para onde, normalmente, migram os dados coletados pelos sistemas supervisórios das subestações;

- UTR (Unidade Terminal Remota), conjunto de equipamentos destinados a aquiritar

e transmitir os dados, via satélite, rádio ou linha telefônica, para o COS respectivo;

- IEC-870-5-101, protocolo de telecomunicações normalmente aplicado para operações e serviço de telemedição e telecomando entre os COS e as UTRs;

- RS485, padrão de rede de comunicação usada em sistemas industriais de aquisição e supervisão de dados;

- MKM01, conjunto de sensores para medição de grandezas em subestações de energia;

- PT100, sondas térmicas para medição das temperaturas em ambientes fluídicos, no caso óleo e ar.

Na figura 3, é possível observar uma representação esquemática dos principais componentes do Sistema de aquisição de dados em uso pelas concessionárias AES Sul e RGE.

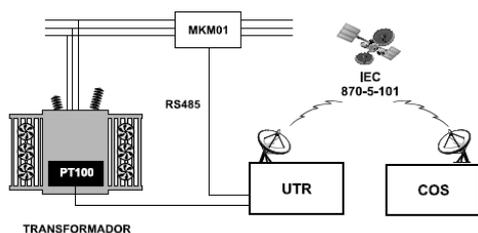


Figura 3 – Esquema do sistema de aquisição de dados e supervisão em uso pela AES Sul e RGE

4.1 Formatação e desenvolvimento do SimTrans

Como concepção e orientação ao desenvolvedor, o SimTrans constituir-se-ia num software de simulação, com interface “amigável”, que aplica a técnica de regressão linear nos dados coletados pelo sistema de aquisição para definir o modelo de comportamento térmico do transformador, permitindo simular o aquecimento do transformador em determinadas situações de cargas e temperaturas ambiente que podem ocorrer na prática, na forma de uma equação tridimensional a duas variáveis independentes e uma variável dependente. Como informação suporte à confiabilidade do modelo, deveria oferecer o tratamento estatístico das diferenças entre os valores medidos (de entrada) e modelados

em faixas escalonadas em 1 °C. Após o estabelecimento do modelo, deveria possibilitar a alternância entre as variáveis, transformando uma variável independente em dependente, e vice-versa, permitindo mudar o objeto da decisão ou simulação. Deveria gerar um ábaco a 3 dimensões.

Relativamente à linguagem de programação, a idéia era desenvolver um sistema todo baseado em software livre, possibilitando assim o acesso, tanto por empresas de grande porte quanto por estudantes, sem que houvesse a existência de gastos com licenças de software. No entanto, o sistema não deveria ser restrito a sistemas operacionais livres, pois muitas empresas ainda trabalham com sistemas operacionais proprietários. Estipularam-se, então, algumas premissas para a escolha da linguagem de programação a ser adotada:

- a linguagem deveria ser multiplataforma: o sistema desenvolvido deveria rodar tanto em sistemas operacionais proprietários (Windows 9X, NT, 2000, XP, Mac OS) quanto em sistemas operacionais livres (GNU/Linux, *BSD);

- o programa deveria ser portátil: o sistema desenvolvido deveria rodar em diferentes plataformas sem que o código precisasse sofrer grandes alterações;

- o programa poderia ser compilado ou interpretado: o sistema deveria ser executado na forma de um executável (binário) ou então seu código poderia ser interpretado, com a ajuda de um interpretador;

- a linguagem escolhida deveria ser simples, de fácil aprendizagem e possibilitar a escrita de um código organizado;

- a linguagem escolhida deveria possuir bibliotecas para criação de interfaces e plotagem de gráficos.

A linguagem escolhida foi o Python (PHYTON, 2004), que atende a todas as premissas colocadas previamente. É uma linguagem multiplataforma, portátil, é simples e de fácil aprendizagem. Os códigos escritos em Python também podem ser interpretados e compilados. Além disso, o Python possui uma grande quantidade de bibliotecas prontas para as mais diversas funcionalidades.

O fluxograma de desenvolvimento do software SimTrans foi concebido e realizado conforme as etapas mostradas pela figura 4.



Figura 4 – Fluxograma básico do SimTrans

5 Teste e avaliação do SAD

Para testar o modelo, o software e o SAD como um todo foram utilizados dados das seguintes subestações de potência:

- AES Sul, subestação São Leopoldo, transformador marca TRAF0, 36/38/60 MVA, 138/23 kV, 19000 litros de óleo, com 55 °C de temperatura limite máxima definida pelo fabricante. Dados adquiridos a cada 15 minutos no período de 01/02 a 28/02/2004 (cerca de 2770 registros);

- AES Sul, subestação Scharlau (Novo Hamburgo), transformador marca TRAF0, 36/38/60 MVA, 138/23 kV, 19000 litros de óleo, com 55 °C de temperatura limite máxima definida pelo fabricante. Dados adquiridos a cada 15 minutos no período de 01/03 a 31/03/2004 (cerca de 3000 registros);

- AES Sul, subestação Zoológico (São Leopoldo), transformador marca TRAF0, 36/38/60 MVA, 138/23 kV, 19000 litros de óleo, com 55 °C de temperatura limite máxima definida pelo fabricante. Dados adquiridos a cada 15 minutos no período de 01/03 a 31/03/2004 (cerca de 3000 registros);

- RGE, subestação Caxias do Sul, transformador marca TRAF0, 25/33/42 MVA, 69/13,8 kV, 15000 litros de óleo, com 55 °C de temperatura limite máxima definida pelo fabricante. Dados adquiridos a cada 15 minutos no período de 01/06 a 10/06/2004 (cerca de 1050 registros);

Os dados decorrentes de períodos de interrupções do sistema que apresentaram “zera-mento” foram desconsiderados. Para determinados dados de comportamento “absurdo e ilógico” relativamente aos dados precedentes ou conseqüentes, que podem ser decorrentes de uma falha ou interferência momentânea do sistema ou sensor, utilizou-se o descarte ou interpolação. Ambas as situações foram insignificantes em relação ao conjunto de dados disponibilizados.

Na seqüência, são apresentados os resultados relativos ao comportamento dos dados medidos e do modelo aplicado a um dos transformadores da subestação Scharlau (Novo Hamburgo).

A figura 5 é a tela com a distribuição dos resultados obtidos com o modelo para a temperatura do óleo, apresenta o erro médio (comparativamente com os valores medidos no mesmo instante), o desvio padrão, a distribuição dos erros em escalas de 1 °C, os limites de enquadramento (e de decisão/confiabilidade) em uma, duas e três vezes desvios padrões e a equação que define o modelo do transformador da subestação Scharlau (Novo Hamburgo).

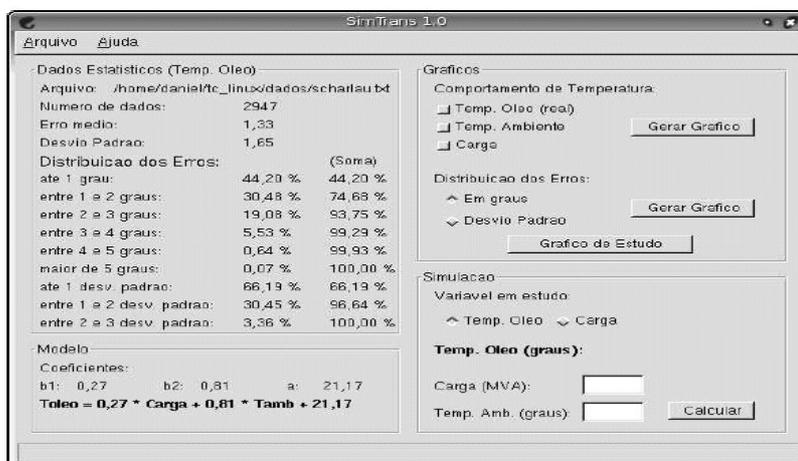


Figura 5 – Tela de apresentação dos resultados estatísticos (temperatura do óleo medidas e modeladas) para o transformador da subestação Scharlau (Novo Hamburgo)

A tela do SimTrans mostrada na figura 5 apresenta, também, no canto inferior esquerdo, a equação que poderá servir de modelo para o regime de comportamento da temperatura do óleo (em °C) em função da carga (em MVA) e da temperatura do ambiente externo (em °C), na forma da equação 1 ($y = A.x_1 + B.x_2 + C$). Ou seja:

$$\text{Toleo} = 0,27 * \text{Carga} + 0,81 * \text{Tamb} + 21,17 \quad (2)$$

Onde os valores 0,27 (A), 0,81 (B) e 21,7 (C) são os coeficientes e:

Toleo é y ou a temperatura do óleo modelada num determinado tempo [°C]

Carga é x_1 ou a potência aparente num determinado tempo [MVA]

Tamb é x_2 ou a temperatura do ambiente externo num determinado tempo [°C]

Ainda na tela da figura 5, é possível observar as opções para visualização de gráficos de comportamento da temperatura do óleo, da temperatura do ambiente e da carga. É oferecida a possibilidade de construir-se gráficos de erros em graus C e em desvio padrão. Por fim, como um ferramental de simulação e apoio à decisão, a tela oferece, como alternativa, a simulação com inversão das variáveis e o cálculo simulado de uma provável temperatura do óleo a uma dada condição de carga e temperatura ambiente.

A tabela 1 apresenta a distribuição dos resultados da figura 5 acrescidos de enquadramentos percentuais dos erros observados no modelo.

Transformador Subestação Scharlau			
Quadro de erros observados entre temperaturas do óleo medidas e modeladas			
número de dados	2947		
erro médio (°C)	1,33	%	% acumulado
desvio padrão (°C)	1,65		
erros até 1 °C	1303	44,2%	44,2%
erros entre 1 e 2 °C	898	30,5%	74,7%
erros entre 2 e 3 °C	562	19,1%	93,8%
erros entre 3 e 4 °C	163	5,5%	99,3%
erros entre 4 e 5 °C	19	0,6%	99,9%
erros maiores que 5 °C	2	0,1%	100,0%
erros até 1 desvio padrão	1950	66,2%	66,2%
erros entre 1 e 2 desvios padrão	898	30,5%	96,6%
erros entre 2 e 3 desvios padrão	99	3,4%	100,0%
total	2947	100,0%	

Tabela 1 – Quadro de apresentação dos erros relativos aos valores da temperatura do óleo medidas e modeladas referentes ao transformador da Subestação Scharlau (Novo Hamburgo)

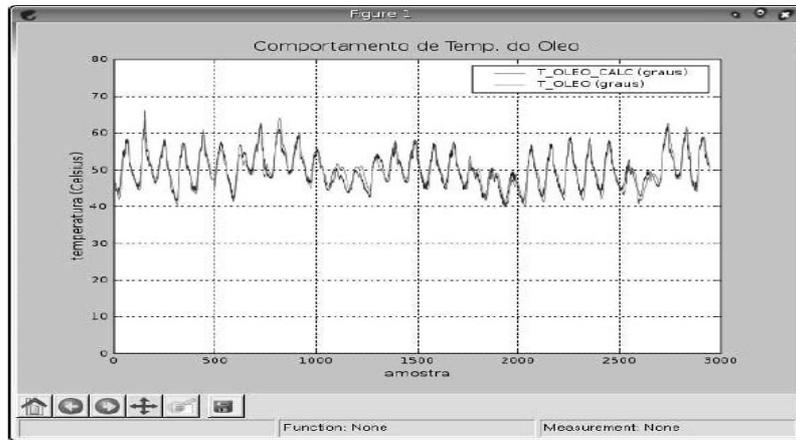


Figura 6 – Tela de apresentação gráfica dos resultados comparativos (temperatura do óleo medidas e modeladas) para o transformador da subestação Sahlrau (Novo Hamburgo)

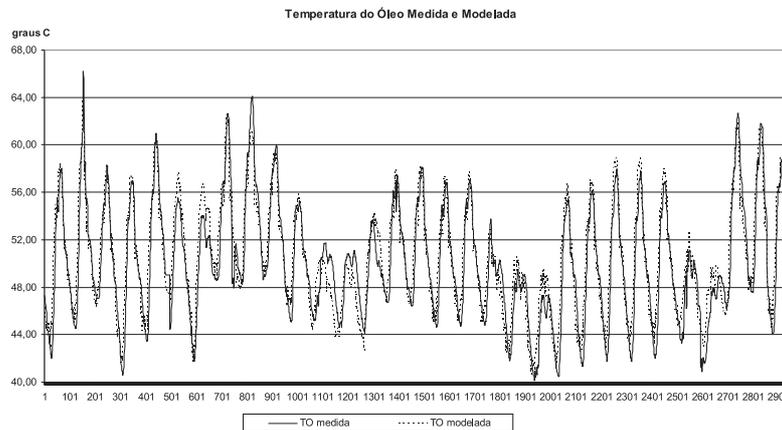


Figura 7 - Apresentação gráfica dos resultados comparativos (temperatura do óleo medidas e modeladas) para o transformador da subestação Sahlrau (Novo Hamburgo) plotados em aplicativo EXCEL

A figura 6 contém a tela do SimTrans com a representação gráfica das curvas das temperaturas do óleo medidas e calculadas pelo modelo.

Como forma de melhor visualização dos resultados da simulação, a figura 7 apresenta o mesmo gráfico da figura 6 trabalhado e ampliado no aplicativo Excel.

5.1 Outros recursos do SimTrans testados na modelagem

Além dos recursos já apresentados e descritos, o desenvolvimento do SimTrans como um aplicativo de interface “amigável” com os usuários incorporou os seguintes recursos, os quais não são objetos de visualização neste artigo:

- tela com menu para busca de arquivos de dados .txt;
- menu de ajuda ao usuário (help);
- gráfico comportamental de todas as variáveis, possibilitando análise de discrepância entre os dados medidos, sugerindo tratamento e depuração;
- tela de visualização da distribuição de erros na forma de gráfico de barras;
- tela de visualização de erros enquadrados em limites de desvio padrão;
- tela gráfica de estudo, na forma de ábaco a 3 variáveis, possibilitando a simulação gráfica visual de uma das variáveis a partir da definição de valores para as outras duas. Para a temperatura do óleo, apresenta curvas operativas com faixas escalonadas de temperatura;

- possibilidade de “zoom detalhado” nas telas gráficas
- telas de simulação numérica para as 3 variáveis;

6 Conclusão

Os experimentos realizados permitem concluir que:

- todos os experimentos foram realizados com uma grande base de dados consistentes (de 1000 a 2950 dados de cada grandeza), permitindo afirmar que os resultados tendem a apresentar alto grau de confiabilidade na conclusão;

- em todos os experimentos, 100% dos erros enquadraram-se dentro do limite de 3 desvios padrões, portanto, dentro do limite de decisão para validação do modelo (RIBEIRO e CATEN, 2000, p. 24);

- considerando o experimento apresentado detalhadamente no artigo (transformador da Subestação Scharlau – Novo Hamburgo), a partir dos erros observados, sua comparação com a “Curva Gaussiana” e o enquadramento nos desvios padrões, o modelo apresenta 45,2% (66,2% x 68,27% de intervalo de confiança) de confiabilidade para tolerância de erros até 1 desvio padrão, 92,2% (96,6% x 95,45% de intervalo de confiança) de confiabilidade para tolerância de erros até 2 desvios padrões e 99,73% (100% x 99,73% de intervalo de confiança) de confiabilidade para tolerância de erros até 3 desvios padrões (SPIEGEL *et al.*, 2004, p. 206).

Analisando-se os resultados nos modelos desenvolvidos para os outros transformadores modelados, os resultados obtidos não são muito diferentes, desta forma, é possível afirmar que:

- a modelagem é confiável e permite apoiar decisões com nível de previsão que não comprometam o regime de funcionamento térmico do equipamento;

- para testar a possibilidade de maximização da confiabilidade do modelo e do SAD, devem ser realizados experimentos que considerem modelos diferenciados de equacionamento para os estágios de ventilação natural

(VN) e de ventilação forçada (VF) dos equipamentos transformadores, visto que tais circunstâncias operativas (VFs) influenciam bastante as trocas térmicas entre o transformador e o ambiente externo, devendo proporcionar um fluxo térmico diferenciado da ventilação natural e, portanto, um equacionamento modelar diferenciado;

- observando os gráficos entre os valores medidos e calculados (figuras 1, 5 e 7), percebe-se uma defasagem de tempo (*delay*) entre o valor modelado e o medido. Acredita-se que tal fenômeno, que amplia a potencialização de erros entre o modelado e o real, possa ser explicado pelo fato de a resposta térmica da carga no aquecimento do volume de óleo (entre 15 e 19 mil litros) não ser tão imediata quanto a resposta matemática apresentada pela equação. A inclusão no modelo de um quarto coeficiente aleatório (*U* ou *D*), conforme citado por Silva e Silva (1999, p. 68), pode ajustar tal circunstância, aumentar a precisão do modelo e a confiabilidade do sistema. A possibilidade de modelar a temperatura interna pelo sensor de “imagem térmica” também pode oferecer respostas mais precisas. Tais experimentos já estão em fase de realização;

- outros fatores não controláveis, mais previsíveis, como chuva, direção e intensidade dos ventos e posição da radiação solar incidente no tanque do transformador, podem influenciar a resposta do modelo na medida em que interferem no fluxo de trocas térmicas do transformador com o ambiente externo. Qualquer possibilidade de modelamento de tais fenômenos certamente acrescentará mais confiabilidade ao SAD;

- através de aperfeiçoamentos no Sim-Trans e, por consequência, no próprio SAD, é possível incluírem-se subsistemas de seleção de dados prevendo modelos para regimes operativos em horários e estações climáticas específicas, os quais poderão subsidiar decisões mais adequadas ao regime de carga pretendido para a operação do equipamento. É possível, ainda, desenvolver modelos, em períodos diferenciados, que possibilitem avaliar

anormalidades ou alterações no fluxo térmico do equipamento (degradação do fluido isolante-refrigerante, falhas no sistema de ventilação, incrustações e sujeira depositadas na carcaça, etc.), fornecendo suporte às decisões relativas ao processo de manutenção a ser adotado. Estas melhorias, certamente, contribuirão para ampliar a confiabilidade do modelo e do SAD.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR-5416 – Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência – Procedimentos**. Brasil, 1997.
- CHRISTIE, C. V. **Elementos de Eletrotécnica**. Porto Alegre: Editora Globo, 1969.
- FERREIRA, D. **SimTrans: Simulador Térmico para Transformadores de Potência. Monografia**. São Leopoldo: UNISINOS, 2004.
- LYNX. **Aquisição de dados. Lynx tecnologia**. Disponível em: http://www.lynxtec.com.br/tutor_aqd1.htm. Acesso em: setembro de 2004.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores**. Porto Alegre: Editora Globo, 1971.
- MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1984.
- MOTA ALVES, J. B. da. **Página da disciplina Teoria Geral de Sistemas -Informática/UFSC**. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/jbosco/tgs>. Acesso em: setembro 2004.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied Linear Statistical Models**. Illinois, United States: IRWIN, 1990.
- PYTHON. **Python Programming Language**. Disponível em: <http://www.python.org>. Acesso em: outubro 2004.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. ten. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: Escola de Engenharia-UFRGS, 2000.
- SILVA, E. M. da; SILVA, E. M. da. **Matemática e Estatística Aplicada**. São Paulo: Editora Atlas, 1999.
- SILVA, P. L. C. **Página sobre Simulação de Processos -UNIOESTE**. Disponível em: <http://www.unioeste.br/agais/simulacao.html>. Acesso em: setembro 2004.
- SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, R. A. **Probabilidade e Estatística**. São Paulo: Bookman, 2004.
- SPRAGUE, R. H.; CARLSON, E. D. **Building Effective Decision Support Systems**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1982.
- SPRAGUE, R. H.; WATSON, H. J. **Sistema de Apoio à Decisão**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1991.
- STOCKBURGER, D. W. **Multivariate Statistics: concepts, models, and applications**. Missouri, United States: Sothwest Missouri State University, 1998.
- TAYLOR, H. R. **Data Acquisition for Sensor Systems**. Great Britain: Chapman & Hall, 1997.
- WEISBERG, S. **Applied Linear Regression**. New York, United States: John Wiley & Sons, 1985.