

PROPOSTAS PARA REDUÇÃO E ATENUAÇÃO DE RUÍDOS ORIGINADOS EM TRANSFORMADORES E SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS DE ALTA POTÊNCIA

Autor: Jorge Luiz Ferreira

Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica
aluno do Programa de Doutorado em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PROMEC - UFRGS), Brasil.
jorge.ferreira@terra.com.br

Orientador: Prof. Dr. Alberto Tamagna

PROMEC – UFRGS – Porto Alegre – RS - Brasil
tamagna.mecanica@ufrgs.br

Resumo

Devido ao rigor crescente da legislação ambiental, a questão dos ruídos oriundos de transformadores e subestações de alta potência tem sido um tema cada vez mais evidente no elenco de problemas enfrentados pela concessionárias de energia elétrica no Brasil. A proposta deste trabalho é listar as soluções técnicas disponíveis e conhecidas para reduzir este problema. Contempla alternativas que abrangem modificações no projeto do equipamento, seu sistema construtivo, o arranjo físico, formas de atenuação e localização das subestações. Comenta níveis de dificuldades das providências sugeridas, assim como as estimativas econômicas de cada uma, relativamente aos valores despendidos em equipamentos e subestações convencionais. Finalmente, propõe o desenvolvimento de experimentos científicos com a finalidade de investigar a eficácia das medidas sugeridas.

Palavras-chave: Transformadores de Potência; Ruídos; Meio Ambiente.

Abstract

Proposes for Reduction and Attenuation of Noises Coming from Electrical High-power Transformers and Substations. Due to the increase and several environmental legislation, the noises coming from electrical high-power transformers and substations have been an important theme among the problems faced by the electric power companies in Brazil. The purpose of this work is to list the available and known technical solutions to reduce this problem. It presents alternatives that include modifications in the project of those equipments, their construction systems, the layouts, the attenuation forms and the location of the substations. It comments the levels of difficulties of each proposed solution, as well as the economical cost related to the values spent in equipments and conventional substations. Finally, it proposes the development of scientific experiments with the purpose of investigating the effectiveness of each technical recommendation.

Key Words: High-power Transformers; Noises; Environmental.

Introdução

Embora seja uma recomendação antiga, bastante citada na literatura e manuais técnicos relativos aos transformadores empregados em sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica, a questão do nível de ruídos emitidos por tais equipamentos, em especial os chamados transformadores de alta potência (ou transformadores de força), somente tem tido uma investigação mais aguda nos últimos tempos. O grande fator que tem contribuído para o aprofundamento das pesquisas neste campo, e a busca de soluções eficazes, é a questão ambiental.

Com o acelerado crescimento dos sistemas urbanos de transmissão e distribuição de energia elétrica, assim como as necessidades de interligações e alternativas técnicas que visam dar mais confiabilidade aos sistemas nas cidades de médio e grande porte, é praticamente impossível implantar-se subestações transformadoras de alta potência em áreas sem vizinhança próxima. É neste aspecto que a questão dos ruídos produzidos por estes equipamentos passa a ser encarada como um problema recente e de abrangência crescente para as concessionárias de transmissão e distribuição de energia elétrica. Da mesma forma, tais equipamentos tem sido objeto de investigação e implantação de medidas para a adequá-los às novas legislações ambientais preventivas e às normativas técnicas, que, respectivamente, determinam níveis máximos de ruídos admissíveis em meio urbano e as emissões dos chamados "transformadores de baixo ruído". Outras soluções atenuadoras para as situações já existentes e irreversíveis, tais como o uso de isolamentos e barreiras acústicas, também tem sido estudadas e propostas.

Dada a importância do tema e a dificuldade de literatura científica disponível, visto que os fabricantes não disponibilizam tais informações com a abrangência desejada, este trabalho tem como objetivo listar algumas das principais medidas técnicas, a nível de projeto, construção e implantação de equipamentos, que podem contribuir para a redução de ruídos e vibrações em subestações de alta potência.

De forma complementar, serão apresentadas algumas medidas atenuadoras, assim como uma perspectiva de quantificação dos níveis de ruído e o emprego de espectros medidos, como fonte de informação para detecção de anormalidades.

Conceitos básicos sobre transformadores e os ruídos produzidos

Os transformadores de energia elétrica são máquinas eletromecânicas, estacionárias e (quase) estáticas, que têm como princípio de funcionamento os fenômenos descritos na "Lei de Lenz", e como função principal modificar os valores, elevando ou rebaixando, dos níveis de tensão na entrada e na saída. Para isso, necessitam de dois enrolamentos adjacentes e eletricamente isolados, situados dentro do mesmo campo (e núcleo) magnético, e uma corrente alternada responsável pela variação do fluxo magnético. Para elevados níveis de potência e tensão, característicos dos sistemas de transmissão e sub-transmissão de grandes quantidades de energia elétrica, utilizam-se os denominados transformadores de alta potência (também chamados transformadores de potência ou transformadores de força).

Os transformadores de alta potência são constituídos basicamente dos seguintes componentes:

- **Parte ativa**, que compreende o núcleo ferro-magnético e os enrolamentos primário e secundário (em alguns casos usam-se enrolamentos terciários para aterramento ou alimentação dos serviços da subestação);
- **Tanque**, que compreende a carcaça ou caixa, os radiadores e os acessórios de conexão externa, controle e proteção;
- **Fluido isolante e refrigerante**, em quantidade e qualidade suficiente para promover a transferência do calor gerado na parte ativa para a superfície externa do envólucro (na grande maioria dos casos utiliza-se óleo mineral isolante ou, em casos especiais e restritos, fluídos sintéticos à base de silicone ou similares).

Conforme definido em Christie (1966) e Martignoni (1971), para minimizar e restringir o efeito das chamadas "correntes parasitas" o núcleo magnético é composto pelo empilhamento de lâminas de liga Ferro-Silício (1,5 a 3% de Si), tipo grão orientado, com espessuras da ordem de 0,3 a 0,35 mm. Segundo os autores, associado aos fenômenos magnetizantes do núcleo, provocados pela corrente alternada, surgem os "ciclos de histerese magnética" que atuam diretamente nos magnetos elementares que compõem o núcleo (moléculas de Fe-Si) sob a forma de atrito. Os dois fenômenos simultâneos, as correntes parasitas e as perdas por histerese, constituem-se no que se denomina "perdas no ferro", e que, juntamente com as "perdas no cobre" (efeito Joule sobre os condutores dos enrolamentos), são responsáveis pela perda de rendimento e potência transformada, resultando em potência não útil sob a forma de calor (predominantemente), ruídos e forças mecânicas.

Grande parte desta energia perdida apresenta-se sob a forma de calor. Outra parcela, principalmente a decorrente dos fenômenos de histerese magnética e das correntes parasitas caracterizam-se na forma de ruídos audíveis e vibrações mecânicas [Gerges (2000)], sendo estas últimas agravadas pela variação de sentido do campo magnético em duas vezes a frequência da corrente elétrica que o provoca. Conforme Hayt Jr. (1994) estes fenômenos são decorrentes do efeito da magnetostricção ou "deformação dos

cristais" dos materiais que compõem o núcleo magnético. No trabalho intitulado "Sistemas Bajo Campo Magnético" [s.a. (s.d.)] é possível encontrar-se as equações que permitem quantificar o fenômeno da magnetostricção.

Sobre os ruídos produzidos nos transformadores, é interessante reproduzir-se a descrição de Guarnaldo et al. (1997): *"O ruído audível característico dos transformadores de força é causado principalmente pela magnetostricção do núcleo. Quando um transformador é ligado a um sistema de frequência 'f', seu núcleo fica sujeito a uma vibração mecânica complexa de frequência '2f'. A não linearidade da lei de magnetostricção explica a presença de harmônicos na vibração do núcleo. A vibração complexa resulta assim da superposição de vibrações senoidais cujas frequências são harmônicas pares da frequência do sistema elétrico"*. No caso do Sistema Elétrico Brasileiro (ou sistema em 60 Hz) essas frequências são 120, 240, 480, 960... Hz. Em sistemas de 50 Hz as harmônicas atuam em 100, 200, 400, 800... Hz.

Observações de campo permitem afirmar que, relativamente à potência nominal do equipamento, quanto menor a potência transformada, são mais perceptíveis os ruídos de origem magnética. Justifica-se pelo fato do equipamento operar com valores mais próximos da "corrente de excitação" e com tensões primárias mais elevadas. Na maioria das subestações tais condições ocorrem à noite, combinando com períodos de maior "silêncio" urbano, o que acentua os efeitos desagradáveis dos ruídos no ambiente externo vizinho.

As lâminas que constituem o núcleo magnético são extremamente delgadas (cerca de 0,30 mm) e com uma largura muitas vezes inferior ao comprimento (10 a 20 vezes na maioria dos projetos). Ou seja, relativamente ao comprimento, são placas delgadas e estreitas. Portanto, quando devidamente excitadas, são muito mais suscetíveis aos efeitos das ondas vibrantes. Esta é a principal fonte de ruídos.

As espiras que compõem os enrolamentos são confeccionadas com condutores de seções delgadas relativamente aos diâmetros e comprimentos das espiras, tornando-as figuras geométricas muito suscetíveis a influência das vibrações de origens magnéticas e mecânicas.

É possível concluir-se que os ruídos originados nos transformadores podem ser classificados em dois grupos interdependentes: os de origem eletromagnética, caracterizados por uma espécie de "zumbido" oriundos da frequência principal e suas harmônicas pares, e os de origem mecânica, como consequência das vibrações (provocadas pelo eletromagnetismo) dos componentes da parte ativa.

O fluido isolante-refrigerante comporta-se como um atenuante também neste processo. Sob um campo de observação externo ao tanque do equipamento, o nível de ruído percebido é menor devido a atenuação do fluido isolante-refrigerante. Os chamados "transformadores a seco" (sem fluido e sem tanque), com emprego recomendado em algumas circunstâncias, apresentam níveis de ruídos maiores. Devido a sua viscosidade, o fluido isolante-refrigerante atua também como amortecedor das vibrações da parte ativa.

Para concluir, é necessário comentar-se que, além das citadas, os transformadores de alta potência podem apresentar outras fontes de ruídos mecânicos de origem não magnética, por exemplo: os ruídos do sistema de ventilação forçada de ar (externa e incidente nos radiadores), os ruídos de sistemas de bombeamento (convecção forçada) do fluido isolante-refrigerante e ruídos mecânicos e elétricos dos dispositivos de comutação de tensão sob carga.

Revisão bibliográfica

Após intensa pesquisa nos meios de divulgação de publicações científicas, não se obteve acesso a nenhuma publicação específica sobre a redução e atenuação de ruídos em transformadores de alta potência. Mesmo assim, entendeu-se como importante listar uma série de trabalhos, livros e materiais de divulgação que abordam, mesmo que de forma secundária, os ruídos e seus efeitos nestes equipamentos, bem como as ações preventivas e corretivas para a eliminação ou minimização de seus efeitos.

Ferreira (1978) recomenda uma observação criteriosa sobre a ocorrência de ruídos de condição anormal como um dos critérios que devam ser observados para determinar manutenções preventivas, preditivas e corretivas. Cita ainda que, nos casos de manutenção corretiva, quando ocorrerem reconstituição dos enrolamentos, que sejam usados dispositivos para melhor estabilização do núcleo magnético utilizando o "enfaixamento" por cadarço de algodão das colunas do núcleo magnético (que não são prensadas mecanicamente) a fim de minimizar as vibrações. No mesmo trabalho, recomenda ainda a impregnação com verniz isolante (utilizando-se equipamento tipo "auto-clave" à quente) nos enrolamentos primários e secundários como forma de melhorar a isolamento interna entre as espiras e promover uma maior estabilida-

de mecânica entre as mesmas, visto que o verniz utilizando tem excelentes propriedades adesivas. Os reapertos gerais nos componentes metálicos da parte ativa e a re-estabilização mecânica dos enrolamentos (com o uso de calços de papelão) são medidas recomendadas e essenciais para a isolamento e redução dos ruídos nos equipamentos.

O folheto de divulgação da SIEMENS (1978) apresenta características técnicas de transformadores a seco, impregnados com resinas isolantes sintéticas que conferem características de menores níveis de ruídos a estes equipamentos, cujo emprego é recomendado para ambientes fechados.

Milasch (1984) apresenta um completo manual sobre transporte, recebimento, inspeção e manutenção em transformadores de alta potência imersos em líquido isolante. Cabe ressaltar que os cuidados com a presença de ruídos não se restringem somente às condições de projeto, fabricação e operação, pois as especificações e normas técnicas são extremamente exigentes com as condições de transporte dos equipamentos. Condições de anormalidades, choques mecânicos e movimentos bruscos podem comprometer a estabilidade mecânica da parte ativa. Tais normativas recomendam o acompanhamento do frete por meio de tacógrafos e medidores de impacto. O uso de gás inerte (Nitrogênio) pressurizado em substituição ao fluido isolante-refrigerante também é recomendado como forma de impedir que a oscilação do fluido durante o transporte possa comprometer a estabilidade mecânica da parte ativa.

Em outra monografia sobre programas de manutenção preventiva em transformadores, Ferreira (1988) recomenda a observância de ruídos anormais como fator decisivo para a retirada de operação e aplicação imediata de manutenção preventiva em oficina especializada, visto que podem ter origem na falta de estabilidade mecânica da parte ativa, promovendo conseqüências mais graves relativamente aos danos nos enrolamentos.

Ferreira et al. (1988) avaliam que a atuação repetida de dispositivos de proteção dos enrolamentos primário e secundário, devido a curto-circuitos, podem provocar deslocamentos mecânicos na parte ativa, a conseqüente desestabilização mecânica e o aumento de ruídos, entre outros problemas, fatores que justificariam uma imediata retirada de operação do equipamento e encaminhamento para ações preventivas em oficinas especializadas.

Farias et al. (1997) apresentam um estudo de caso relativo a medição, simulação e providências sobre a presença de ruídos oriundos do fenômeno da magnetostricção e das vibrações mecânicas em uma subestação transformadora localizada no bairro de Sumaré, São Paulo - SP, operada pela ELETROPAULO. Descrevem partes da legislação ambiental de origem federal, estadual e municipal a respeito dos ruídos urbanos, onde definem-se os limites de 71 dB como toleráveis para o período diurno e 59 dB para o período noturno. Apresentam ainda resultados obtidos com a adoção de barreiras acústicas a base da chapas de fibro-cimento, lã de rocha e chapas de aço perfuradas.

Guaraldo et al. (1997) caracterizam o ruído audível em transformadores de alta potência localizados em subestações urbanas, como causado pelo fenômeno de magnetostricção do núcleo magnético. Na medida em que a frequência padrão dos sistemas elétricos é de 60 Hz, descrevem que as vibrações presentes no núcleo são predominantemente de 120 Hz, visto a inversão senoidal do sentido da corrente elétrica em cada ciclo. Comentam a presença de frequências harmônicas pares de 120 - 240 - 480... Hz que provocam vibrações complexas, devido a não linearidade do fenômeno que as causa (magnetostricção). Descrevem os ruídos produzidos como similar a "zumbido" que tem sido motivo de incômodos e reclamações por parte de moradores das vizinhanças das subestações. Estimam que tais ruídos podem atingir 75 a 80 dB e recomendam uma série de medidas preventivas de projeto, especificação, barreiras acústicas naturais e artificiais de atenuações, além de sugerir uma metodologia para o atendimento de reclamações referente as subestações em operação. Estimam ainda que os chamados "transformadores silenciosos", recomendados para aplicação em subestações localizadas em regiões urbanas e com densa vizinhança residencial, devam operar com nível de ruído na faixa de 64 dB (sem ventilação forçada atuando). Finalmente, apresentam um aplicativo computacional para avaliação destes ruídos.

Requena (1997) apresenta uma série de gráficos comportamentais dos níveis de ruídos em diversos equipamentos utilizados em centrais geradoras de energia elétrica, entre eles o referente aos transformadores de alta potência.

Gerges (2000) apresenta um completo livro sobre ondas acústicas e ruídos, efeitos nos seres humanos, instrumentação para medição, estruturas vibrantes e recursos para isolamento, filtragem e controle de ruídos em maquinário geral. Sobre o tema "ruídos em transformadores", embora sem abordagem específica indicada, depreende-se que podem ser enquadrados no grupo de ruídos produzidos por "placas vibrantes" as lâminas de Ferro-Silício que compõem o núcleo magnético, quando submetidas à inversão de fluxo magnético variável na frequência de operação de 60 Hz, além das demais frequências harmônicas.

Cita ainda a possibilidade de adoção de atenuadores de ruídos artificiais (materiais filtrantes e absorvedores) e naturais (barreiras de vegetação), a fim de minimizar a propagação em linha reta de ruídos desagradáveis provocados por equipamentos. Outro fato a considerar, relativamente ao equipamento em estudo, são os acréscimos de ruídos causados por ventiladores axiais, muito usados em sistemas auxiliares de refrigeração de transformadores de potência.

A publicação de Jain et al. (2000), embora não cite qualquer preocupação quanto a presença de ruídos em transformadores, apresenta um interessante estudo sobre a interferência de campos eletromagnéticos nos sensores utilizados para o monitoramento de temperatura e umidade interna de transformadores de potência, principalmente sobre a interferência das frequências de ressonância. Tal estudo poderá ter extrema utilidade no desenvolvimento de sistemas para sensoreamento, medição e acompanhamento de ruídos instalados internamente aos transformadores.

Leon et al. (2001) apresentam um aprofundado estudo sobre ruídos e harmônicas presentes em transformadores de baixa potência, com aplicações para as áreas de medicina, telecomunicações e computacionais, provando e recomendando a adoção de bobinas toroidais, encapsuladas e resinadas como solução minimizadora.

Apresentando uma linha de transformadores com potências até 500 MVA e níveis de tensão de até 800 kV, o catálogo da SIEMENS (2001) para transformadores de força permite visualizar uma série de procedimentos adotados para a redução de ruídos, entre eles: a utilização de chapas de Ferro-Silício, com grão orientado tipo HI-B e com espessuras entre 0,23 e 0,30 mm, adotando projeto de "empilhamento" das chapas pelo processo "step-lap", enfaixamento das colunas e eficaz sistema de aprisionamento das culatras; preferencial utilização de condutores de seção retangular para confecção dos enrolamentos, o que propicia um melhor assentamento e estabilidade mecânica das espiras, confecção de enrolamentos em forma de bobinas tipo toroidal (ou em "panquecas"), permitindo o calçamento e maior estabilização mecânica; montagem dos enrolamentos com compressão mecânica e envernizamento parcial. As duas "meias" seções de coluna magnética utilizadas lateralmente às 3 colunas principais, com a finalidade de reduzir a dispersão do fluxo magnético, também são recursos empregados em transformadores trifásicos para diminuir as perdas no ferro e, por consequência, o nível de ruídos. Outra alternativa oferecida pelo fabricante é a possibilidade de enclausuramento do tanque em ambiente fechado e o posicionamento dos bancos de radiadores em ambientes externos, isolando o ambiente externo dos ruídos de origem eletromagnética.

Brito Jr. (2002) relata as ações tomadas para uma melhor integração ambiental de uma subestação da COPEL. Relativamente a presença de ruídos característicos de transformadores de potência, a partir da reclamação de moradores da vizinhança, cita a instalação de proteções acústicas, em fase experimental. Não apresenta maiores detalhes técnicos da solução implementada.

O trabalho de Garcia-Souto et al. (2002) descreve um experimento desenvolvido com a finalidade de comparar os resultados obtidos na medição de ruídos em transformadores por sensores internos ao equipamento, com sinal transmitido por fibra-ótica e os acelerômetros comuns externos. Cita as condições adversas internas tais como imersão em óleo, altas temperaturas e intenso campo eletromagnético. O experimento foi desenvolvido para ruídos na faixa de 100 Hz, ou o dobro da frequência do sistema elétrico (que na Europa é de 50 Hz) e as respectivas frequências harmônicas de 200 – 300 – 400 Hz. Apresenta gráficos comparativos e demonstra condições de boa aplicabilidade futura como dispositivos a serem adotados juntamente com os demais conjuntos de sensores que acompanham equipamentos de tal magnitude.

O material de divulgação da Plitron (2002) apresenta um aprofundado estudo e recomenda o emprego de enrolamentos (bobinas) toroidais, encapsuladas e resinadas como bastante eficazes na redução de ruídos, harmônicas e suas indesejáveis influências, principalmente quando empregadas em transformadores para equipamentos médicos, sistemas de telecomunicações e computacionais de grande porte.

Apenas na forma de sumário de o que parece ser um amplo projeto, Ruschinsky (s.d.) recomenda a adoção de monitoramento de 10 parâmetros comportamentais para transformadores de potência, entre eles os ruídos decorrentes da magnetostricção, como uma forma de avaliar desempenho e definir parâmetros decisivos para as manutenções preventivas e preditivas.

Soluções recomendadas para redução e atenuação dos ruídos

Neste tópico procurar-se-á dar uma abordagem ampla das principais medidas que podem ser adotadas com a finalidade exclusiva de promover a redução dos ruídos de origem eletromagnética, e suas

conseqüentes vibrações mecânicas, assim como proceder-se-á comentários quanto a facilidade técnica da adoção, magnitude de custos representativos relativamente ao valor do equipamento, além das vantagens e desvantagens ocasionadas pelas respectivas medidas.

Com a finalidade de enquadrar os procedimentos, entende-se como prático classificar-se as soluções técnicas conforme as fases: projeto do equipamento, construção, tipo e localização das subestações. Para o projeto elétrico do equipamento a principal solução recomendada é a maior redução possível dos fenômenos de histerése magnética e correntes parasitas, reduzindo-se as "perdas no ferro", com a adoção de Ferro-Silício de melhor qualidade e com melhores técnicas de direcionamento dos magnetos elementares (refinamento dos grãos orientados), além da ampliação da seção magnética. Tais procedimentos implicam também numa melhor técnica de corte das lâminas de Fe-Si que comporão o núcleo magnético. Estima-se que o núcleo de Fe-Si é um componente com participação importante no valor final dos transformadores (entre 15 e 20 %). Conforme já citado, o uso de colunas auxiliares (que não recebem enrolamento) nas extremidades, com seções equivalentes à metade da seção das colunas principais, constitui-se numa das medidas utilizadas para a redução das perdas no ferro e do nível de ruídos. As medidas sugeridas implicam em acréscimos tecnológicos importantes e não muito acessíveis, que encareceria bastante o valor final de um equipamento similar.

Embora previsto no projeto, as técnicas recomendadas para a redução de ruídos e vibrações, listadas na seqüência, devem ser implementadas nas fases de construção e montagem do equipamento:

- *Amarração das colunas do núcleo ferro-magnético* – consiste em aplicar as técnicas de enfaimento ("mumificação") com bandagens de algodão, ou qualquer outro material sintético isolante, pouco elástico, durável e resistente as condições de trabalho do equipamento (temperatura e contato com óleo ou fluídos sintéticos), conferindo-se a maior rigidez possível ao processo e reduzindo-se as vibrações mecânicas das lâminas que constituem a coluna. A utilização de elementos de escora que visem aproximar a coluna do núcleo do formato escalonado para o formato cilíndrico, também consiste num importante elemento redutor das vibrações mecânicas. Tais medidas não agregariam custos significativos, mas deveriam compatibilizar-se com os níveis de refrigeração esperados para a superfície do núcleo em contato com o fluído isolante-refrigerante;

- *Utilização de elementos amortecedores nos sistema de fixação das culatras* – as culatras inferiores e superiores são responsáveis pela estabilidade mecânica do núcleo ferro-magnético e também são compostas pela mesma quantidade e tipo de lâminas utilizadas nas colunas. Diferente das colunas, onde se posicionam os enrolamentos, as culatras são prensadas por estruturas de aço ou madeira (duas inferiores e duas superiores), utilizando-se de parafuso "prisoneiros", "porcas", arruelas simples e "de pressão". A utilização de dispositivos de fixação com elementos amortecedores de vibração, constituir-se-ia num fator atenuante das vibrações mecânicas do núcleo. Torna-se necessário ressaltar que tais elementos devem ser, como todos os componentes internos, resistentes e duráveis nas condições de operação do equipamento. Imagina-se que tais providências não apresentem desvantagens técnicas e acréscimos significativos ao custo do equipamento;

- *Uso de condutores retangulares nos enrolamentos* – procedimento amplamente adotado com a finalidade de economizar volume de enrolamento (quando comparado com o volume perdido no uso de espiras com seção circular), consiste numa excelente técnica para melhorar o assentamento das espiras e, por conseqüência, a susceptibilidade aos movimentos mecânicos decorrentes das vibrações. Portanto, torna-se desnecessário comentar acréscimos de custos e desvantagens.

- *Enrolamentos com bobinas tipo toroidal e calços* – a utilização de bobinas tipo toroidal ("disco" ou "panqueca") intercaladas com calços de material isolante (papelão, madeira ou sintéticos) contribuem decisivamente para a estabilização do enrolamento sujeito a vibrações mecânicas. Se os calços tiverem propriedades amortecedoras os efeitos serão melhores. Esta técnica traz como grande desvantagem o aumento de volume do enrolamento. Em compensação, além da redução dos ruídos, melhora os aspectos de refrigeração (maior superfície de contato do fluído com o enrolamento) e propicia substituições parciais dos enrolamentos no caso de avaria. É um procedimento largamente empregado e, portanto, não produziria acréscimos de custos significativos;

- *Encapsulamento dos enrolamentos* - este procedimento, muito empregado em transformadores à seco, consiste em impregnar as bobinas toroidais com resinas aderentes e resistentes as condições operativas do equipamento (geralmente sintéticos à base de silicone). Seu emprego elimina, ou reduz drasticamente, as vibrações mecânicas e eventuais atritos entre as espiras das bobinas. Como desvantagem podem ser citados a possibilidade de uma menor troca de calor entre o fluído isolante-refrigerante e os conduto-

res. Podem ser previstos acréscimos de custos relativos ao produto empregado e ao processo de construção;

- *Fixação da parte ativa ao tanque utilizando dispositivos amortecedores* – considerando que o fluído isolante-refrigerante atua com elemento de amortecimento de ruídos e vibrações mecânicas oriundas da parte ativa, os dispositivos de fixação desta ao tanque atuam como elementos de condução direta desses efeitos ao ambiente externo. A adoção de dispositivos com características amortecedoras constituem-se num fator de redução eficaz e com custos muito baixos relativamente ao valor total do equipamento;

- *Utilização de dispositivos mecânicos amortecedores externamente ao tanque* – com a finalidade de reduzir o efeito das vibrações mecânicas em dispositivos, acessórios, radiadores ou componentes da estrutura do tanque, que possam ser modelados mecanicamente como do tipo "viga em balanço", recomenda-se o uso de dispositivos tipo amortecedores, adequados a cada situação específica, feito de material durável e resistente as condições externas de operação do equipamento (temperatura, umidade, radiação solar, agentes poluentes, etc.). Imagina-se que a adoção destas técnicas não apresentariam desvantagens operacionais e custos expressivos.

Com relação ao terceiro grupo de procedimentos recomendados para redução do nível de ruídos, os relativos ao projeto, especificação e localização da subestação transformadora, as recomendações básicas são as seguintes:

- *Especificar equipamentos com menor nível de ruído* – em subestações localizadas em regiões densamente urbanizadas devem ser previstos equipamentos com níveis de ruído que atendam, ou aproximem-se, do estabelecido na legislação ambiental vigente (do município, do estado ou federal). Tais equipamentos podem apresentar custos de 5 a 10 % maiores que os equipamentos convencionais. A remoção de equipamentos convencionais para localidades de vizinhança mais remota e a substituição por equipamentos mais silenciosos são alternativas interessantes para os novos projetos;

- *Uso de barreiras acústicas* – a técnica de "produzir áreas de sombras de ruídos" [Gerges (2000)] com barreiras acústicas do tipo paredes de alvenaria, concreto, e revestimentos de materiais isolantes e ressonadores, pode constituir-se numa boa solução atenuadora para vizinhança com edificações de poucos pavimentos (máximo 2 a 3). Os custos envolvidos não são expressivos. Porém, se não forem tomados os cuidados técnicos pertinentes, podem ocasionar sério comprometimento da refrigeração adequada às condições operativas do equipamento, comprometendo-o. Nestes casos, a solução toma complexidades técnicas e custos maiores, pois podem envolver direcionamento de ar e "chicanes" de ventilação forçada complementar à do equipamento;

- *Uso de tanques enclausurados* – esta solução muda completamente o "layout" da subestação e o projeto construtivo do equipamento. Consiste em posicionar o tanque com a parte ativa em um recinto fechado, e isolado acusticamente, e o sistema de troca de calor do fluído isolante-refrigerante (os bancos de radiadores, ventiladores, resfriamento por gás ou água e bombas) no ambiente externo. Os custos envolvidos são altos e podem chegar a quase 50 % do valor estimado para subestações convencionais, pois envolvem também uma grande mudança nas conexões à rede de transmissão de energia. Relativamente à redução de ruídos, os resultados são excelentes.

- *Uso de radiadores montados em separado* - esta alternativa também consiste numa mudança relativamente aos "layouts" das subestações convencionais e constitui-se em utilizar "bancos" de radiadores não fixados ao tanque, posicionados em pedestais, proporcionando maiores áreas de troca de calor e dispensando o uso de ventilação auxiliar. Entre outros fatores, este procedimento serve também para isolar a propagação para os radiadores das vibrações oriundas do tanque. Em termos econômicos é menos dispendiosa que a solução anteriormente proposta;

- *Uso de barreiras "verdes"* [Gerges (2000)] – esta solução somente é possível em situações de disponibilidade de terrenos desocupados no entorno da subestação. Pelos custos imobiliários envolvidos verifica-se ser uma alternativa muito cara e aplicável somente em situações de menor densidade de vizinhança, onde o problema dos ruídos não é prioritário;

- *Uso do ruído de fundo como "camuflagem"* – este procedimento visa "mascarar" o ruído causado pelo transformador comparativamente com maiores níveis de ruídos causados pelo ambiente urbano do entorno da subestação (intenso tráfego rodoviário, ferrovias, aeroportos, fábricas, etc.). Entende-se que esta alternativa não deva constituir-se num encaminhamento tecnicamente adequado e decisivo para novos projetos de subestações e suas respectivas localizações;

– *Localizar as subestações em terrenos elevados* – esta alternativa consiste em instalar as subestações em terrenos elevados (cumes) relativamente a região vizinha (vales). O uso combinado com as "barreiras acústicas" pode produzir boa solução quando a vizinhança ocupa prédios com maior número de pavimentos. A possibilidade de uma maior exposição às descargas atmosféricas (raios) pode gerar custos adicionais aos sistemas de proteção.

Mesmo dispondo-se de diversas alternativas para redução e controle dos níveis de ruídos e vibrações mecânicas, não se tem fácil acesso aos estudos científicos e medições destes fenômenos, seja pelo meio acadêmico, ou seja, pelos fabricantes. Portanto, uma avaliação mais aprofundada da eficácia das soluções citadas está condicionada a implementação de experimentos com esta finalidade, ou o acesso aos resultados obtidos a experimentos já realizados em circunstâncias similares.

À similaridade do que ocorre em outros equipamentos mecânicos e eletromecânicos, entende-se que medições do espectro de ruídos e vibrações presentes em transformadores de alta potência, avaliando-se grandezas do tipo nível de pressão sonora, espectro de frequências e RMS, por exemplo, pode contribuir decisivamente para encaminhar soluções que reduzam o problema, tanto no aspecto técnico como no econômico, além de fornecer informações para os processos de planejamento da manutenção preventiva e preditiva. Da mesma forma, nas futuras contestações a ocorrências envolvendo concessionárias de energia elétrica e vizinhança de subestações, os valores e parâmetros técnicos obtidos poderiam subsidiar as discussões de encaminhamento de soluções ou de contestações.

Conclusões

Considerando que a proposta deste trabalho consistia em listar todas as opções tecnicamente possíveis e disponíveis para conseguir-se a redução e atenuação de ruídos e vibrações em subestações transformadoras de alta potência, entende-se que o objetivo definido foi atingido.

Mesmo sem dispor-se de dados experimentais confirmativos, é possível afirmar-se que dentre as propostas previstas para o projeto e construção do equipamento, certamente as mais eficazes e dispendiosas são as que implicam em aumento de seção ou melhorias de qualidade no núcleo eletromagnético, reduzindo as perdas no ferro e suas componentes audíveis e vibratórias. As demais providências citadas, que visam reduzir o efeito das vibrações mecânicas (estabilização do núcleo, enrolamentos e o uso de dispositivos de amortecimento) podem produzir excelentes resultados a custos baixos. Há necessidade de experimentos ou resultados que confirmem cientificamente tal afirmação.

As demais soluções que implicam no emprego de layouts não convencionais, barreiras atenuantes e localização especiais para subestações, são alternativas dispendiosas e recomendadas em casos onde a possibilidade de utilizar equipamentos mais silenciosos são remotas ou não atingem os parâmetros desejados para os ruídos. Algumas destas medidas podem constituir-se em soluções parciais ou temporárias.

Mesmo considerando dificuldades técnicas decorrentes de, na maioria dos casos, tais equipamentos terem fabricação tipo específica e não serial, outro aspecto fundamental, que deve constituir-se como proposta futura, é o desenvolvimento de protótipos que possibilitem monitorar a eficácia das tecnologias construtivas de redução e atenuação de ruídos e vibrações, que foram sugeridas ao longo deste trabalho. Os resultados obtidos com critérios científicos, certamente, constituir-se-ão em confiável fonte de informações e futuros estudos sobre a rentabilidade técnica e econômica das alternativas propostas.

Referências Bibliográficas

BRITO JR., José H., 2002. **Mitigação de Impactos Ambientais nas Subestações de 139 kV da Região de Ponta Grossa – PR**. Publicação científica, XV SENDI – XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Curitiba, Brasil, 3p.

CHRISTIE, Clarence. V., 1969. **Elementos de Eletrotécnica**. Ed. Globo. Porto Alegre, RS, Brasil, 822 p.

FARIAS, Aurélio P., DELALLO, Sumara D., BISTAFA, Sylvio R. e GRIMONI, José A. B., 1997. **Aplicação da Legislação Ambiental no Meio Urbano – Controle de Ruído em Subestação**. Publicação científica, XIV SNTPEE – XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Brasil, 7 p.

FERREIRA, Jorge L., 1978. **Serviços de Manutenção em Transformadores**. Monografia de graduação em engenharia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, RS, Brasil. 44 p.

- FERREIRA, Jorge L., 1988. **Manutenção Preventiva de Transformadores de Distribuição – Planejamento e Implantação**. Monografia, I Concurso de Contribuições Técnicas do Clube dos Engenheiros da CEEE – I CONTEC, Porto Alegre, RS, Brasil, 25 p.
- FERREIRA, Jorge L., TESSMER, Hélio, 1988. **Dispositivos de Proteção para Circuitos Secundários em Redes Aéreas**. Monografia, I Concurso de Contribuições Técnicas do Clube dos Engenheiros da CEEE – I CONTEC, Porto Alegre, RS, Brasil, 24 p.
- GARCIA-SOUTO, J. A. e LAMELA-RIVERA, H., 2002. **Comparative Analysis of Optical-fibre Interferometric Sensors Versus Accelerometers: Application to Vibrations Inside High-power Transformers**. Publicação científica, Optoelectronics and Laser Technology Group, Department of Electronics, Universidad Carlos III, Madrid, Espanha, 9 p.
- GERGES, Samir N. Y., 2000. **Ruído, Fundamentos e Controle**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ruídos, Florianópolis-SC, Brasil, 676 p.
- GUARALDO, Newton J., MONTEIRO, Carlos L., GRIMONI, José A. B., KIATAKE, Luís G. G., SAIDEL, Marco A. e BISTAFA, Sylvio R., 1997. **Avaliação do Ruído de Transformadores no Entorno de SE's – Aplicativo e Simulação**. Publicação científica, XIV SNPTEE – XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Brasil, 7 p.
- HAYT JR., William H., 1994. **Eletromagnetismo**. Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 404 p.
- JAIN, Mahaveer K., SCHMIDT, Stefan, ONG, Keat G., MUNGLE, Casey e GRIMES, Craig A., 2000. **Magnetoacoustic Remote Query Temperature and Humidity Sensors**. Publicação científica, Center for Micro-Magnetic and Electronic Devices, Department of Electrical Engineering, University of Kentucky, Lexington, KY, EUA, 9p.
- de LEON, Francisco, GLADSTONE, Brian e van der VEEN, Menno, 2001. **Transformer Based Solution to Power Quality Problems**. Publicação científica, Pliton Manufacturing Incorporation, Ontário, Canada, 13 p.
- MARTIGNONE, Alfonso, 1971. **Transformadores**. Ed. Globo. Porto Alegre, RS, Brasil, 307 p.
- MILASCH, Milan, 1984. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante**. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Editora Edgar Blücher Ltda., São Paulo-SP, Brasil, 1984, 354 p.
- PLITRON MANUFACTURING INCORPORATION, 2002. **Narrow Bandwidth Technology**. Catálogo técnico, Ontário, Canadá, 6 p.
- REQUENA, J. M., 1997. **Niveles de Ruido en Centrales Generadoras de Energia Eléctrica**. Tecnica-custica, Oviedo, Espanha, 4p.
- RUSCHINSKY, Vladimir N., [s.d.]. **Developing Hardware, Software and Methodical Support for Diagnostics of High-power Transformer Windings Without Their Disassembly**. Resumo de projeto. ISTC Project 1873 – Non-Destructive Diagnostics of Transformer Coils, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Rússia, 2p.
- SIEMENS LTDA., 1978. **Transformadores a Seco em Resina – GEAFOL**. Catálogo técnico, São Paulo, SP, Brasil, 2 p.
- SIEMENS LTDA., 2001. **Transformadores de Força**. Catálogo técnico, São Paulo, SP, Brasil, 12 p.
- [s. a.], [s. d.]. **Sistemas Bajo Campo Magnético**. Material didático, 19 p.