

COMPORTAMENTO DO RUÍDO ACÚSTICO EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO A ÓLEO

ACOUSTIC NOISE BEHAVIOR IN OIL DISTRIBUTION TRANSFORMERS

Data de entrega dos originais à redação em: 24/11/2015
e recebido para diagramação em: 30/05/2017

Marco Antonio Ferreira Finocchio ¹
Jeferson Gonçalves Ferreira ²

Este artigo tem como objetivo apontar as principais fontes geradoras de ruído acústico nos transformadores de distribuição da classe 15kV, descrevendo os processos necessários para realizar os ensaios dentro do laboratório do fabricante com todas exigências estabelecidas pela NBR 7277/2013. Por meio da implementação de um algoritmo para simulações dos níveis de ruído, considerando seus aspectos construtivos, mostrando seu comportamento mediante a variação da indução magnética na chapa do núcleo. Também será realizada a comparação entre os valores encontrados com o algoritmo desenvolvido e os valores medidos no laboratório do fabricante, verificando sua eficiência, e se eles estão de acordo com a NBR 5356-3/2014.

Palavras-Chaves: Transformadores. Análise de Ruídos Acústico. Fontes Geradoras de Ruído.

This article aims to identify the main acoustic noise generating sources in the class 15kV distribution transformers, describing the processes required to carry out the tests within the manufacturer's laboratory with all the requirements established by NBR 7277/2013. By means of the implementation of an algorithm for simulations of noise levels, considering its constructive aspects, showing its behavior through the variation of the magnetic induction in the core plate. A comparison of the values found with the developed algorithm and the values measured in the manufacturer's laboratory will also be performed, verifying their efficiency, and if they are in accordance with NBR 5356-3/2014.

Keywords: Transformers. Acoustic Noise Analysis. Noise Generating Sources.

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que têm a função de transmitir, mediante um campo eletromagnético alternado, a energia elétrica de um sistema, com determinada tensão, para outro sistema, com a tensão desejada, porém com capacidade e frequência inalteradas (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 2006).

Todo transformador em operação emite ruído acústico, que tem como causa básica a magnetostricção, causada pela expansão e contração do núcleo de ferro (lâminas), devido ao efeito magnético da corrente que flui através de alternância das bobinas do equipamento. A magnetostricção pode ser parcialmente controlada na concepção do transformador, mas não totalmente eliminada.

Existem basicamente três fontes de geração de ruído em transformador, como pode ser observado na Figura 1

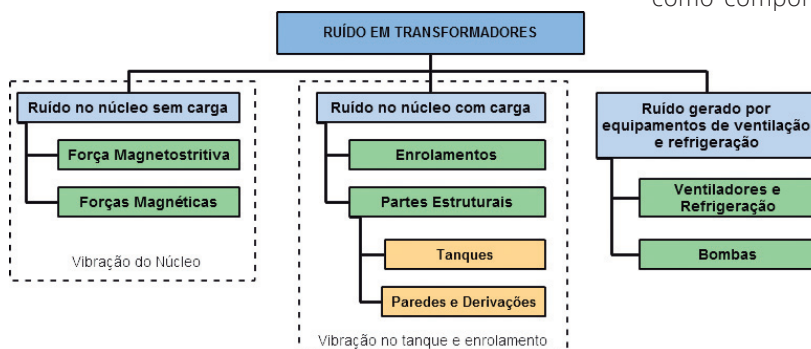


Figura 1 - Fontes de ruído em transformador. Fonte: Próprio autor.

A frequência do som fundamental é o dobro da frequência de exploração da linha de alimentação do transformador (isto é, um transformador de 50Hz produz um som de 100Hz e um transformador de 60Hz produz um som de 120Hz). Além da frequência fundamental, harmônicos também são produzidos. Este efeito é uma propriedade importante dos materiais ferromagnéticos. Devido a esta propriedade, sempre que um material ferromagnético entra em contato com variação do campo magnético, ocorre uma alteração em suas dimensões no interior do transformador. Isto ocorre no núcleo de lâminas magnéticas e em seus enrolamentos de alta e baixa tensão em ambos os lados (FERREIRA, 2015).

Em virtude da variação da tensão aplicada, o campo magnético variável é produzido, e estes campos magnéticos variáveis são responsáveis pela alteração das dimensões do material ferromagnético utilizado como componente do transformador produzindo vibrações (SHENGCHANG, YANMING, CHENG 2005).

Até 1960, o ruído gerado por transformadores tinha importância secundária. Atualmente o ruído acústico tornou-se um tipo de poluição sonora ambiental, para a qual o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece os níveis de ruído prejudiciais à saúde pública, não podendo ultrapassar os valores regidos pela norma (NBR 10151, 2000).

1 - Departamento de Engenharia Elétrica - UTFPR CP. < mafinocchio@utfpr.edu.br >.

2 - Acadêmico Engenharia Elétrica - UTFPR. < jefersongf_07@hotmail.com >.

A preocupação com o ruído audível emitido por equipamentos elétricos dentro de ambientes industriais surgiu no início do século XX, mas o estudo sistemático do comportamento acústico de subestações elétricas teve início na década de 1960 (RODRIGUES, MEDEIROS, PAVANELLO, 1998).

Assim, durante as décadas seguintes o ruído de transformadores investigados tem diminuído consideravelmente (RODRIGUES, MEDEIROS, PAVANELLO, 1998).

2 METODOLOGIA

Os ensaios e simulações foram realizados em 6 classes de transformadores trifásicos de distribuição com potência de 15kVA, 30kVA, 45kVA e 75kVA, 112,5kVA e 150kVA com classe de tensão de 15kV. Porém, neste artigo serão abordadas apenas as três primeiras classes de potência.

Com a implementação do algoritmo via *Matrix Laboratory* (MATLAB), utilizara-se como valores de entrada os aspectos construtivos dos transformadores, tais como: indução da chapa do núcleo [T], distância entre os eixos do núcleo [mm], área de referência [m²], área da superfície de medição [m²], altura do tanque [m], comprimento da linha prescrita de contorno [m]. Estes valores foram fornecidos por dois fabricantes, tratados aqui como Fabricante A e B.

A Figura 2 apresenta o funcionamento do diagrama de bloco do algoritmo utilizado no trabalho.

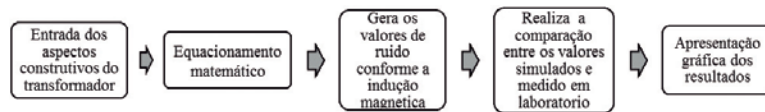


Figura 2 - Diagrama de bloco do funcionamento do algoritmo
 * equacionamento matemático e algoritmo não apresentados devido a proteção da propriedade intelectual

Os transformadores emitem um zumbido característico. Ele é uma preocupação considerável em áreas urbanas, podendo causar desconforto e descumprir os limites estabelecidos pela norma NBR 5356-3/2014 – Transformadores de Potência. A qual determina que os níveis de ruído produzidos pelos transformadores não devem ultrapassar os limites estabelecidos pela Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis de ruídos para transformador a óleo de acordo com a potência nominal igual ou inferior a 500kVA

Nível médio de ruído dB(A)	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos kVA
48	1 – 50
51	51 – 100
55	101 – 300
56	301 - 500

Fonte: NBR 5356-3/2014.

As medições foram realizadas nos laboratórios dos Fabricantes A, seguindo todos os processos e exigências,

conforme estabelecidos pela NBR 7277/2013. Com tais informações, foi possível demonstrar graficamente o valor de ruído em cada um dos 8 pontos de medições e calcular o valor médio de ruído emitido por um transformador.

Assim, realizou-se a comparação entre os valores simulados e a média dos valores medidos, para verificar o desempenho do algoritmo proposto. E averiguar como eles estão se comportando perante a norma NBR 5356-3/2014.

O ensaio de nível de ruído deve ser executado conforme estabelece a NBR 7277/2013. Entre as exigências dessa norma, tem-se que o local de ensaio deve proporcionar um campo praticamente livre sobre o plano refletor utilizado para medições. Com isso, o local pode ser uma sala comum, desde que os objetos refletores sejam removidos da proximidade do equipamento em ensaio com exceção do plano refletor, contorno não perturbadas por reflexões provenientes de outros objetos.

Nesse tópico, a NBR 7277/2013 estabelece as seguintes condições de medições:

- Para medição do nível de ruído, o equipamento ensaiado deve estar com seus equipamentos auxiliares normais, em razão de que eles podem influenciar o resultado da medição;
- O transformador deve ser excitado em vazio com tensão nominal, de forma senoidal e frequência nominal, com o comutador ligado na derivação principal;
- Os níveis de ruído do equipamento e do ambiente devem ser determinados como níveis de pressão acústica, conforme ponderação da escala A, expressa em dB(A). Para evitar erros de medição devido às influências perturbadoras, deve ser utilizada a indicação de resposta rápida do medidor;
- Quando o equipamento possuir sistema de resfriamento, os motores dos ventiladores e/ou bombas de óleo devem estar operando com tensão nominal, de forma senoidal e com frequência nominal.

Na execução do ensaio, a altura do microfone durante as medições do nível do ruído ambiente deve ser a mesma que a utilizada para a medição do nível de ruído do equipamento, devendo as medições ser efetuadas em pontos localizados sobre a linha prescrita de contorno. E, antes e depois de cada sequência de medições, deve ser realizada uma verificação acústica dos equipamentos de medição, através de um calibrador.

A Figura 3 apresenta os pontos de medição realizados no ensaio. Neste estudo as medições foram realizadas a 1 metro do transformador.

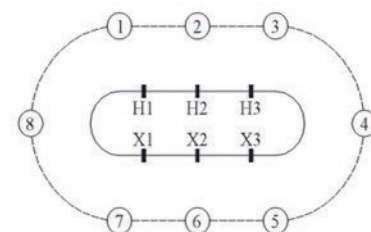


Figura 3 - Ponto de medição. Fonte: NBR 7277 (2013).

Para fins das medições efetuadas no transformador com ou sem o equipamento de resfriamento, o transformador deve ser excitado em vazio com tensão nominal, de forma senoidal e frequência nominal, estando o comutador, se existir, ligado à derivação principal. A tensão deve ser medida de acordo com a NBR 7277/2013, observadas as prescrições referentes ao ensaio de corrente de excitação e perdas em vazio. Se o transformador for equipado com comutador de derivações em carga do tipo reator e se o reator em determinadas posições do comutador estiver permanentemente energizado, a medição deve ser feita com o transformador ligado numa derivação correspondente a esta condição e o mais próximo possível da derivação principal. A excitação deve ser correspondente à derivação usada:

- Quando esta seção fizer referência a mudanças de derivações, admitir-se-á que esta deve ser do tipo de variação de tensão a fluxo constante. Para método de variação de tensão a fluxo variável, a derivação escolhida é a tensão de excitação que deve ser objeto de acordo entre fabricante e comprador.
- Não é aconselhável fazer medições de ruído em grandes transformadores nos primeiros minutos subsequentes a sua energização quando esta for efetuada instantaneamente.

3 ANÁLISE E RESULTADOS

3.1 Simulações

Nas simulações, os valores da indução magnética das chapas foram variadas num intervalo de 1,5 a 1,9T para verificar o comportamento do ruído do transformador, e se eles vão estar dentro dos valores permitidos pela NBR 5356-3/2014.

A Figura 4 apresenta as simulações realizadas com os transformadores de (a) 15kVA, (b) 30kVA e (c) 45kVA, dos fabricantes A e B, utilizando seus aspectos construtivos e variando a indução magnética das chapas do núcleo do transformador. Os dois fabricantes utilizam chapa de aço silício de grão orientado com uma indução magnética de 1,7T.

Como pode ser observado na Figura 4 (a), o transformador do fabricante A apresentou um nível de ruído de 45,24dB(A) e o do fabricante B 46,34dB(A), existindo uma diferença de 1,10dB(A), ou seja, 2,29% entre os dois fabricantes. Com isso, foi possível concluir que o transformador do fabricante A tem um nível de ruído menor para o transformador de 15kVA, mas os transformadores de ambos os fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do limite especificado pela NBR 5356-3/2014. Vale salientar que a percepção auditiva das variações de intensidade sonora é aproximadamente igual a 1dB(A). Isto significa que será necessário uma diferença de 1dB(A) no nível

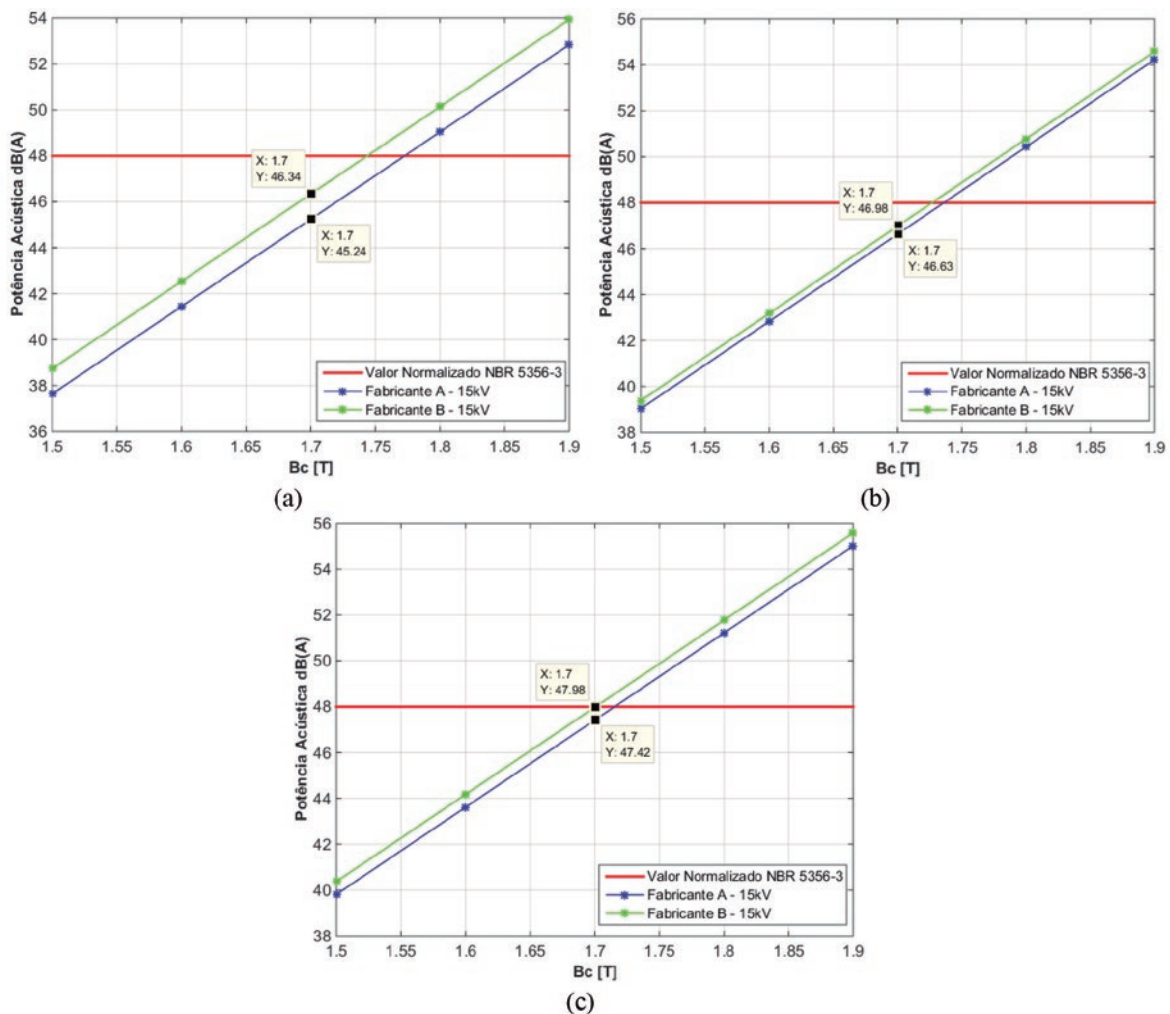


Figura 4 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de (a) 15kVA, (b) 30kVA e (c) 45kVA, em função da indução magnética das chapas

do ruído para distinguir a intensidade sonora entre um som e outro.

Como observado na Figura 4 (b), o transformador do fabricante A apresentou um nível de ruído de 46,63dB(A) e do fabricante B 46,98dB(A), existindo uma diferença de 0,35dB(A), ou seja, 0,73% entre os dois fabricantes, sendo essa diferença imperceptível ao ouvido humano. Com isso, é possível concluir que o transformador do fabricante A tem um nível de ruído inferior para o transformador de 30kVA, mas ambos os fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do limite especificado pela NBR 5356-3/2014.

E como pode ser observado na Figura 4 (c), o transformador do fabricante A apresentou um nível de ruído de 47,42dB(A) e o do fabricante B 47,98dB(A), existindo uma diferença de 0,56dB(A), ou seja, 1,17% entre os dois fabricantes, sendo uma diferença imperceptível ao ouvido humano. Com isso, foi possível concluir que o transformador do fabricante A tem um nível de ruído menor para o transformador de 45kVA, mas ambos fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do limite especificado pela NBR 5356-3/2014.

3.2 Medições e Comparações

As medições foram realizadas no laboratório do Fabricante A, seguindo todas as exigências estabelecidas pela NBR 7277/2013. Com tais informações, foi possível realizar a construção de uma tabela com os valores de ruído em cada um dos 8 pontos de medição (transformador mais ruído ambiente) e calcular o valor médio de ruído emitido por um transformador.

Assim, realizou-se a comparação entre os valores simulados e a média dos valores medidos, para mostrar o desempenho do algoritmo proposto. E verificar como eles estão se comportando perante a norma NBR 5356-3/2014.

Para os transformadores de 15kVA, 30kVA e

45kVA, foi construída a Tabela 2, a qual apresenta os valores medidos nas 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

A Figura 5 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014, sendo (a) 15kVA, (b) 30kVA e (c) 45kVA.

Como apresentado na Figura 5(a), o valor simulado foi de 45,24dB(A) e o valor médio das medições 44,8dB(A), apresentando uma diferença de 0,44dB(A), sendo uma diferença de 0,92% entre o valor simulado e o real. Com isso, foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os

Tabela 2 - Valores de ruído medido para o transformador de 15kVA, 30kVA e 45kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)		
	15 kVA	30kVA	45kVA
1	44,9	46,1	47,2
2	45,3	46,5	47,4
3	44,8	46,2	47,1
4	44,4	45,7	46,4
5	44,7	46,4	47,3
6	45,1	46,9	47,5
7	44,7	46,5	47,1
8	44,5	45,8	46,5
média	44,8	46,3	47,1

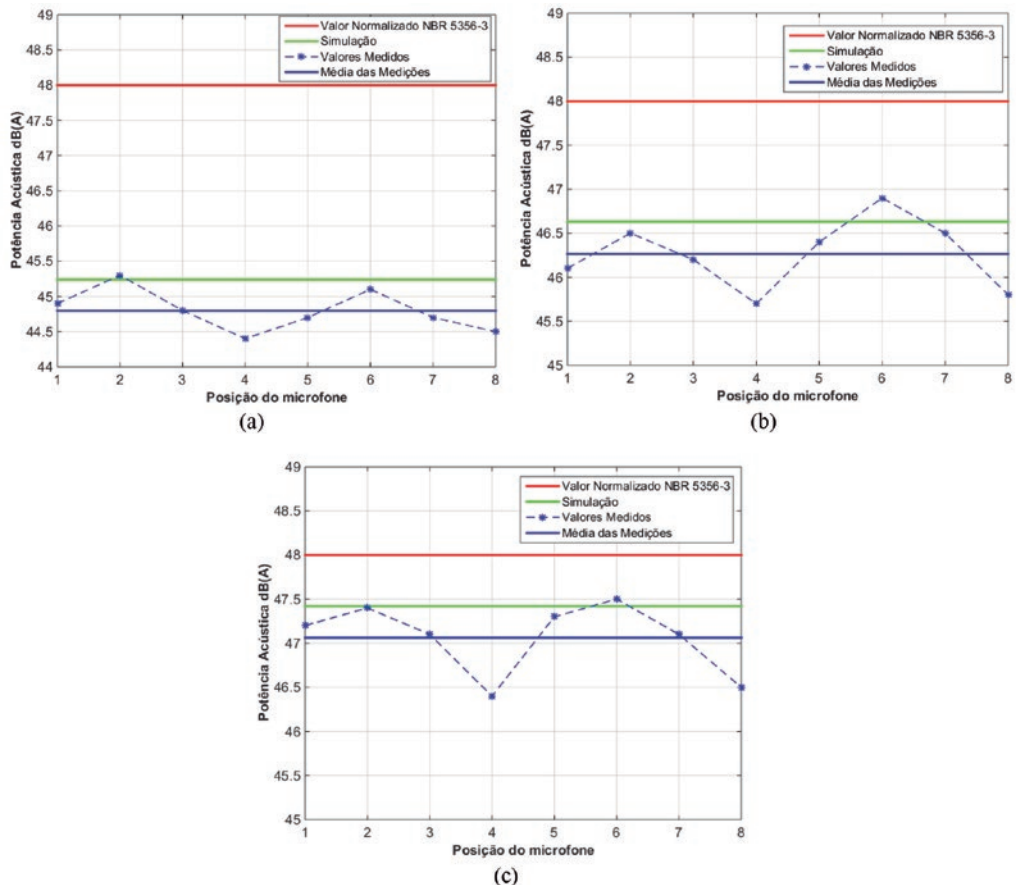


Figura 5 - Ruído simulado, medido, média das medições e normalizado, para o transformador de (a)15kVA, (b)30kVA e (c)45kVA

valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma, os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

Como observado na Figura 5(b), o valor simulado foi de 46,63dB(A) e o valor médio das medições 46,3dB(A) apresentando uma diferença de 0,33dB(A), sendo uma diferença de 0,69% entre o valor simulado e o real. Com isso, foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

Como pode ser observado na Figura 5(c), o valor simulado foi de 47,42dB(A) e o valor médio das medições 47,1dB(A) apresentando uma diferença de 0,32dB(A), sendo uma diferença de 0,67% entre o simulado e o real. Com isso, foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

4 CONCLUSÃO

Devido à crescente exigência da legislação ambiental, a questão de ruídos proveniente dos transformadores é um tema cada vez mais evidente no elenco de problemas enfrentados pelas concessionárias de energia elétrica.

O objetivo do trabalho foi associar o nível de ruído com a variação de indução da chapa do núcleo do transformador, sendo possível apresentar graficamente que, quanto maior a indução da chapa utilizada na construção do núcleo, maior será o ruído produzido por ele.

O algoritmo proposto levou em consideração aspectos construtivos fornecidos por dois fabricantes que foram chamados de fabricante A e B. Porém, apenas o fabricante A se prontificou a fornecer os valores reais medidos no laboratório e conceder permissão para acompanhamento do processo de medição.

Logo em seguida, realizou-se a comparação entre os valores simulados e os valores reais medidos no laboratório do fabricante A, sendo possível constatar que o algoritmo proposto atingiu resultados satisfatório, os quais foram visualizados por gráficos.

A seguir realizou-se a comparação entre os valores simulados, medidos e normalizados, o que possibilitou verificar que todos transformadores avaliados apresentaram valores dentro dos exigidos pela NBR 5356-3/2014.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-3: **Transformador de Potência**. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7277: **Transformadores e reatores determinação do nível de ruído**. Rio de Janeiro, 2013.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10151: **Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade**. Rio de Janeiro, 2000.
- [4] FERREIRA, J. G.; **Estudo de ruído em transformadores de distribuição da classe 15kV em função da indução do núcleo**. Monografia (Graduação) - UTFPR - Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Cornélio Procopio, 2015.
- [5] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles J.; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas** – com introdução a Eletrônica de Potência. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [6] RODRIGUES, V. F.; MEDEIROS, E. B.; PAVANELLO, L. **Mapeamento preliminar de emissão acústica em uma subestação elétrica urbana**. Anais do I Congresso Ibero-americano de Acústica, 1998.
- [7] SHENGCHANG, JI; YANMING, Li; CHENG, Jin. **Research on Vibration Characteristics of Windings and Core of Oil-Filled Transformer**. Journal of Xi'an Jiaotong University, Vol. 39, 2005.