

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO HIROSHI NOGUEIRA NAZU

**PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DE RUÍDO EM
TRANSFORMADORES DE ALTA POTÊNCIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

EDUARDO HIROSHI NOGUEIRA NAZU

**PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DE RUÍDO EM
TRANSFORMADORES DE ALTA POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de conclusão de curso II, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Hiroshi Nogueira Nazu

Procedimentos de medição e análise de ruído em transformadores de alta potência

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:00hs do dia 09/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chiesse da Silva - (Membro)

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - (Membro)

Dedico este trabalho à minha família,
por acreditarem que seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio pelo apoio, orientação e paciência na orientação deste trabalho, aos professores da banca examinadora, Prof. Dr. Luiz Marcelo Chiesse da Silva e Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges e ao professor suplente Prof. Me. João César de Paula Salve por toda atenção e contribuições dedicadas a este trabalho.

Aos meus pais Kanishiro Nazu e Fátima dos Santos Nogueira e a minha irmã, Erica Nogueira Nazu, por acreditarem em mim, pelo apoio, suporte, carinho e amor com os quais sempre pude contar.

Agradeço também a todos os amigos e colegas de curso que compartilharam das dificuldades, dos momentos difíceis, dos longos dias e noites de estudo, mas também das risadas e momentos de alegria presentes nesta jornada, e também aos demais professores e pessoas que contribuíram de alguma forma com este trabalho, a todos, os meus singelos agradecimentos.

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

- Albert Einstein

RESUMO

NAZU, Eduardo H. N. **Procedimentos de medição e análise de ruído em transformadores de alta potência**. 2017. 58 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Transformadores são partes essenciais de todo sistema de potência existente e graças a esses equipamentos é possível abaixar e elevar tensões a níveis desejados para diversas aplicações. Todo transformador em operação emite um ruído, quanto maior a potência desse transformador, maior será seu nível de ruído. Os ruídos em transformadores são atualmente uma grande preocupação, existindo normas regulamentadoras que estipulam valores limites para intensidade de nível de ruído. Assim, apresenta-se neste trabalho um estudo com o intuito de demonstrar a importância da medição dos níveis de ruído nos transformadores de alta potência.

Palavras Chave: Transformadores, ruído, medição.

ABSTRACT

NAZU, Eduardo H. N. **Procedures and analysis of noise measurement in high power transformers**. 2017. 58 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

Transformers are essential parts of all existing power system, due to the equipment, it is possible to lower and raise the voltage to desired levels for a lot of applications. All transformers in operation mode emit a noise, the higher is the potency of the transformer, the greater its noise level. The noises in transformers are currently a major concern, there are regulatory rules that stipulate limit values of intensity of noise level. Thus is presented in this work, a study in order to demonstrate the importance of measuring noise levels in high power transformers.

Keywords: Transformers, noise, measurement.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficiente médio de absorção acústica.....	22
Tabela 2 - Fatores de correção devido a influência do ruído ambiente.....	26
Tabela 3 - Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente.....	27
Tabela 4 - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos	28
Tabela 5 - Ficha de ensaio de medição de ruído	31
Tabela 6 - Entradas e resultados	33
Tabela 7 - Desvio padrão	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de refrigeração dos transformadores	17
Figura 2 - Sistema de refrigeração com ventiladores	19
Figura 3 - Medidor de nível de pressão sonora	21
Figura 4 - Pontos de medição	22
Figura 5 - Desenho esquemático do transformador	22
Figura 6 - Transformador de potência	23
Figura 7 - Layout de pontos de medição	25
Figura 8 - Curva Normal	30
Figura 9 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo	33
Figura 10 - Nível de pressão acústica de ruído de fundo do transformador 1	35
Figura 11 - Curva normal do ruído de fundo do transformador 1	36
Figura 12 - Nível de pressão acústica do transformador 1	36
Figura 13 - Curva normal do ruído do transformador 1	37
Figura 14 - Nível de pressão acústica de ruído de fundo do transformador 2	37
Figura 15 - Curva normal do ruído de fundo do transformador 2	38
Figura 16 - Nível de pressão acústica do transformador 2	39
Figura 17 - Curva normal do ruído do transformador 2	39
Figura 18 - Nível de pressão acústica - LpA	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
1.3	Metodologia	14
2	CONSTITUIÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE ALTA POTÊNCIA.....	15
2.1	Fontes causadoras de ruído	15
2.2	Sistema de refrigeração de transformadores.....	16
2.3	Ruído	20
3	MEDIÇÃO DE RUÍDO	21
3.1	Procedimento de medição de ruído	24
3.2	Níveis de ruído tolerados	28
3.3	Desvio padrão	29
3.3.1	Curva Normal	30
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	31
4.1	Simulações.....	31
4.2	Resultados	34
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	41
5.1	Considerações finais.....	41
5.2	Trabalhos futuros	42
	REFERÊNCIAS.....	43
	APÊNDICE A – Algoritmo criado via <i>MatLab</i>	46
	APÊNDICE B – Função criada via <i>MatLab</i>.....	51
	APÊNDICE C – Dados em formato txt	53
	ANEXO A – Fichas de medições realizadas pelo fabricante	56

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas elétricos que surgiram no mundo utilizavam corrente contínua para a iluminação de grandes cidades como Nova Iorque e Londres. Estes sistemas elétricos apresentavam como inconveniente uma perda excessiva nos alimentadores, devido ao fato de suas cargas serem afastadas da geração. Como as tensões nominais dos geradores de corrente contínua eram baixas, as perdas de energia nesses alimentadores chegavam a ser tão elevadas que possuíam a mesma ordem de grandeza da potência consumida pela carga. O aparecimento do transformador de potência modificou a história dos sistemas elétricos, possibilitando transportar energia elétrica em altas tensões e conseqüentemente obter menores perdas por efeito Joule, tendo em vista que em altas tensões as correntes eram menores.

O transformador de potência é uma máquina elétrica estática de alto rendimento, que possui a finalidade de transmitir, através de um campo eletromagnético alternado, a energia elétrica de um sistema com determinada tensão a outro sistema com outro valor de tensão desejado em um sistema de energia elétrica (SIMONE, 1998).

Os transformadores de potência têm o seu rendimento avaliado, levando em consideração que são máquinas com a finalidade de transferir energia elétrica entre circuitos de tensões diferentes, mas esta transferência de energia não é ideal, o que caracteriza as perdas existentes em um transformador (FITZGERALD, 2006).

Assim, como toda máquina, o transformador emite ruídos e o nível de ruído é uma característica operacional muito importante do transformador, medido em cada teste final usando métodos prescritos pela norma NBR 7277 (Transformadores e reatores, determinação do nível de ruído). Os valores medidos devem atender aos valores recomendados de nível de ruído permitidos pelas normas técnicas das concessionárias de energia elétrica nacionais de distribuição de energia e por normas que regulamentam o nível de ruído de acordo com o local de instalação, como a norma NBR 10151 (Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade).

.Os valores recomendados de nível de ruído para o transformador de potência são definidos dependendo da potência do transformador, tensão de teste e

sistema de resfriamento, assim, com o aumento do nível de potência, o nível de ruído permitido no transformador também é aumentado.

1.1 Justificativa

Com a crescente demanda de energia elétrica mundial, a necessidade de atender cargas maiores é eminente, a utilização de transformadores de alta potência passa a ser cada vez mais comum, observando-se que quanto maior a potência do transformador, maior o nível de ruído emitido pelo mesmo. Com o nível de ruído, ou pressão acústica, aumentando, juntamente com a preocupação com os fatores referentes à poluição sonora e normas que regulam níveis de ruído, torna-se necessária a busca por estudos referentes aos procedimentos de medição de ruído nesses equipamentos.

1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo referente aos procedimentos de medição de ruído em transformadores de alta potência, com o intuito de detalhar esse assunto, bem como explicar as causas dos ruídos e os índices de ruído tolerados pelas empresas e normas reguladoras.

1.2.2 Objetivos específicos

Tem-se neste trabalho os seguintes objetivos específicos:

- Evidenciar a importância do nível de ruído em transformadores;
- Estudar as principais causas geradoras de ruídos nos transformadores de alta potência;
- Explicar a metodologia da medição de ruído em transformadores;

- Desenvolver um algoritmo capaz de realizar os cálculos presentes no procedimento de medição de ruído;
- Obter e apresentar os resultados na forma de gráficos com base em dados provenientes de fabricantes;
- Realizar a análise dos resultados.

1.3 Metodologia

Para a realização deste trabalho, primeiramente foi realizado um estudo sobre transformadores de potência, tendo em vista a familiarização com seus aspectos construtivos e seu modo de operação, para compreender os fenômenos que nele ocorrem durante seu funcionamento.

Posteriormente foram estudados os conceitos referentes a ruídos em transformadores, perdas no núcleo e o fenômeno da magnetostricção, enfatizando este último assunto que é a principal causa geradora de ruído em transformadores de potência. Com base nesses estudos, iniciou-se o estudo sobre medições de ruído em transformadores de alta potência.

Posteriormente foram adquiridos dados referentes a ensaios de níveis de pressão acústica de ruído de fundo e de transformadores de acordo com as respectivas potências, esses dados foram adquiridos através de consulta com o fabricante.

Com os dados adquiridos, foram realizados cálculos de acordo com o procedimento de medição, a fim de obterem-se valores ponderados do nível de pressão acústica do transformador e do ruído de fundo, observando-se nesta etapa a necessidade de realização de cálculos repetitivos. Com intuito de facilitar e diminuir a probabilidade de erros, utilizando o software *MatLab (Matrix laboratory)*, foi desenvolvido um algoritmo capaz de realizar todos os cálculos necessários para a obtenção dos resultados. A validação do algoritmo foi realizada comparando-se os resultados fornecidos pelo fabricante com os resultados obtidos pelo algoritmo.

Os resultados foram então expressos na forma de tabela e gráficos, com os quais se tornou possível realizar a análise dos níveis de pressão acústica obtidos com os níveis tolerados pelo fabricante e pelas normas regulamentadoras, conforme o objetivo principal deste trabalho.

2 CONSTITUIÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE ALTA POTÊNCIA

Os transformadores de alta potência são constituídos basicamente por:

- Parte ativa, que compreende o núcleo ferromagnético e os enrolamentos primário e secundário (em alguns casos são utilizados 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 invólucro (na grande maioria dos casos utiliza-se óleo mineral isolante ou, em casos especiais e restritos, fluidos sintéticos à base de silicone ou similares) (FINNOCHIO, DESTRO, FERREIRA, 2015).

2.1 Fontes causadoras de ruído

Nos transformadores de potência as principais fontes de ruído são o núcleo magnético do transformador, seus enrolamentos, o sistema de refrigeração e ventilação forçada, que pode ser realizada por ventiladores para o resfriamento a ar ou com bombas pelo método de resfriamento à água ou óleo.

Conforme definido em Christie (1966) e Martignoni (1991), para minimizar e restringir o efeito das correntes parasitas, o núcleo magnético é composto pelo empilhamento de lâminas de liga Ferro-Silício (1,5 a 3,0% de Si), tipo grão orientado, com espessuras da ordem de 0,30 a 0,35mm. Os 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.

Segundo Charles (1967) todo transformador em operação emite um ruído cuja magnitude é proporcional à sua potência. Na verdade, dentro do transformador, não existem partes móveis como em motores e geradores, nesses equipamentos a maior causa de ruído são as partes móveis. Nos transformadores, o ruído gerado é

devido ao efeito de magnetostricção que ocorre no interior do transformador. A magnetostricção é a deformação de estruturas cristalinas devido à aplicação de campos magnéticos, observada tanto em monocristais como em policristais do tipo ferromagnético.

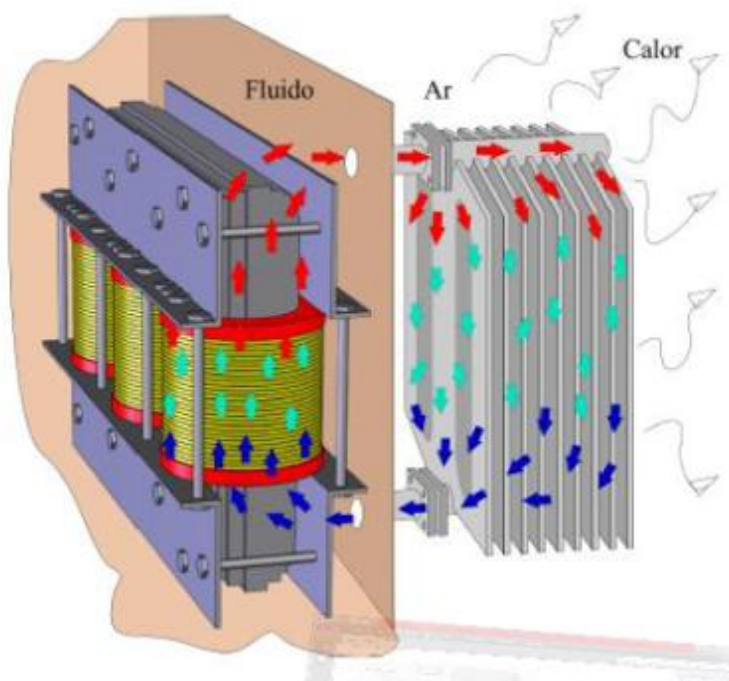
As lâminas que constituem o núcleo magnético são extremamente delgadas (cerca de 0,30 mm) e com uma largura muitas vezes inferior ao comprimento (10 a 20 vezes na maioria dos projetos). Ou seja, relativamente ao comprimento, são placas delgadas e estreitas. Portanto, quando devidamente excitadas, são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

2.2 Sistema de refrigeração de transformadores

A eficiência da refrigeração é um fator fundamental que determina a segurança operacional e o tempo de vida de um transformador, tipo e método de refrigeração do transformador são importantes para a redução da temperatura e do ruído no equipamento. Os transformadores de potência podem ser refrigerados por diversas formas, a norma IEEE C57 12 00 (2011) prescreve um sistema específico para os tipos de refrigeração.

O sistema de marcação que descreve o tipo de resfriamento do transformador é composto por quatro letras maiúsculas, as duas primeiras indicam o tipo e método de refrigeração de circulação de fluido que está em contato com o núcleo magnético e enrolamentos e a terceira e quarta indicam o tipo e modo de circulação do líquido de refrigeração em contato com o refrigerador externo (Figura 1).

Figura 1 - Sistema de refrigeração dos transformadores



Fonte: UNIVERTEC (2013).

Segundo a norma IEEE C57 12 00 (2011) para fluido de refrigeração que se encontra em contato com enrolamentos, são adotados os seguintes códigos:

- O: óleo
- L: líquido
- A: ar

E para o método de fluxo de fluido são os seguintes códigos:

- N: natural
- F: forçada

Para o refrigerante que está em contato com a parte mais fria externa são adotados os seguintes códigos:

- A: ar
- G: gás

- W: água

Os sistemas de refrigeração mais comumente utilizados para transformadores de potência são:

- AN: Transformador a seco sem caixa de proteção;
- ANAN: Transformador a seco com caixa de proteção;
- ONAN: Transformadores a óleo com o fluxo natural do óleo no tanque do transformador e com o ar exterior;
- ONAF: Transformadores a óleo com o fluxo natural do óleo no tanque do transformador e com o ventilador do lado de fora;
- OFAF: Transformadores a óleo com fluxo forçado de óleo no tanque do transformador conduzido por bombas e com ventiladores;
- ONWF: Transformadores a óleo com o fluxo natural do óleo no tanque do transformador e com uma bomba externa de refrigeração a água;
- OFWF: Transformadores a óleo com fluxo forçado de óleo no tanque do transformador impulsionado por bombas permanentemente ligadas, e uma bomba externa de refrigeração à água.

A forma de códigos e do tipo de refrigeração dos transformadores são constantemente alteradas através de mudanças periódicas das normas, devido ao desenvolvimento de novos sistemas de refrigeração.

O sistema utilizado com maior frequência é a refrigeração natural (ONAN) (OA). O calor é absorvido pelo óleo e dissipado no ar através de radiadores. No sistema ONAN/ONAF (OA/FA ou OA/FA/FA) os radiadores são adicionalmente refrigerados por meio de ventiladores. O sistema de refrigeração pode também consistir de bancos de radiadores separados ou com trocador de óleo ou água (OFWF ou FOW). A refrigeração pode ainda ser incrementada por meio do fluxo direcionado do óleo (ODAF ou ODWF) (SIEMENS S.A, 2007).

Para melhor dissipação de calor são utilizados ventiladores conectados aos radiadores do transformador, a Figura 2 ilustra um exemplo desse tipo de sistema de refrigeração.

Figura 2 - Sistema de refrigeração com ventiladores



Fonte: Adaptado DREAMSTIME (2017).

Segundo Finocchio, Destro e Ferreira (2014), o ruído do ventilador ocorre em função da sua velocidade. Caso o tamanho das hélices diminua o número de hélices deve aumentar, a adequação dos ventiladores e do sistema de refrigeração do transformador causa a atenuação do ruído. O tamanho padrão dos ventiladores utilizados são de 46 a 61[cm] com velocidade entre 900 e 950[rpm], com o nível de ruído entre 64 a 65[dB].

Para instalações que exigem um nível de ruído particularmente baixo, recomenda-se então o uso de transformadores enclausurados com banco de radiadores externo, quanto maior o número de radiadores utilizados, mais rápidas serão as trocas de calor com o ambiente, conseqüentemente melhor será seu sistema de resfriamento e menor será o nível de ruído, dispensando ou diminuindo a utilização de outros acessórios como ventiladores que aumentam o ruído.

2.3 Ruído

Quanto ao ruído originário do transformador é possível citar algumas características:

- Quanto melhor a qualidade dos materiais presentes no núcleo do transformador, menor é o ruído emitido pelo mesmo;
- Todo equipamento que emite ruído fora dos padrões normais, apresenta algum defeito;
- Equipamentos que emitem ruídos acima do normal causam insegurança e desconforto à pessoa que o utiliza;
- O nível de ruído aumenta com o aumento da potência do transformador;
- O ruído é uma característica operacional muito importante e é medido em cada etapa final do processo de fabricação de transformadores.

3 MEDIÇÃO DE RUÍDO

O instrumento de medição representado pela Figura 3 é um medidor de nível de pressão sonora ou acústica (MNPS) da Bruel & Kjaer, também chamado de decibelímetro e consiste em um equipamento utilizado para realizar a medição dos níveis de pressão acústica, e, conseqüentemente, intensidade de sons, já que o nível de pressão acústica é uma grandeza que representa razoavelmente a sensação auditiva de amplitude sonora, quando ponderada. Esse dispositivo é amplamente utilizado em ensaios de medição de ruído.

Figura 3 - Medidor de nível de pressão sonora



Fonte: BRUEL & KJAER (2016).

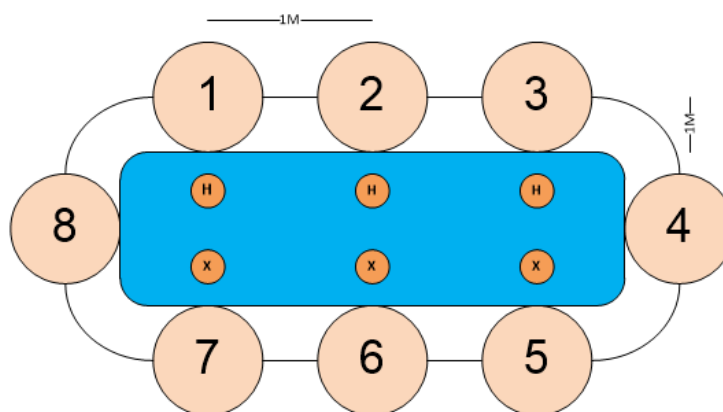
Na primeira etapa, o nível de ruído de fundo deve ser medido (ZAWIESKA, 2007), posteriormente, o transformador deve ser alimentado com tensão e frequência nominais sob condições sem carga e assim realizam-se as medições do ruído do equipamento. Estas medições são realizadas em vários pontos localizados ao redor do transformador, com o instrumento posicionado a uma distância de 0,3m da máquina e esta distância pode ser alterada para até um metro por razões de segurança ou acordo entre fornecedor e comprador do equipamento. Este procedimento de teste está de acordo com a norma NBR 7277 (2013).

As posições de medição devem ser espaçadas a uma distância de, no máximo, um metro uma da outra, sendo necessário no mínimo seis posições. As medições devem ser realizadas à metade da altura do equipamento, não ultrapassando 2,5m. Caso o transformador possua altura superior a 2,5m, devem ser

realizadas medições à 1/3 e 2/3 da altura do equipamento. Depois de realizar a medição do nível de ruído do transformador, desenergizado, o nível de ruído do fundo é medido novamente. No caso de haver uma diferença superior a 8[dB], entre o nível de pressão acústica do transformador e o nível de pressão acústica do ruído de fundo, o nível final de pressão acústica do transformador deve sofrer a aplicação de uma correção, tendo em conta o maior nível de ruído de fundo (GIRGIS, GARNER, BERNESJO, ANGER, 2008).

A Figura 4 representa os pontos onde as medições devem ser realizadas, conforme sugerido pela norma NBR 7277 de 2013.

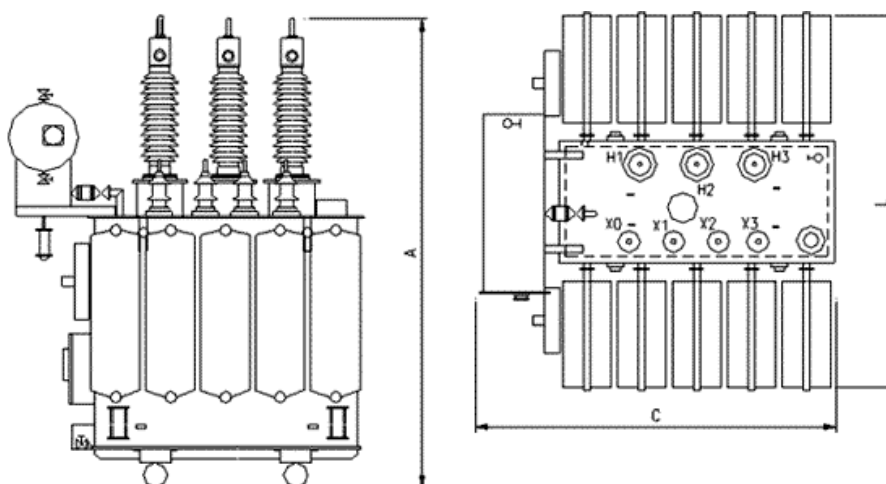
Figura 4 - Pontos de medição



Fonte: Adaptado NBR 7277 (2013).

A Figura 5 mostra os desenhos que representam o desenho do transformador.

Figura 5 - Desenho esquemático do transformador



Fonte: Catálogo WEG (2012).

A Figura 6 mostra um exemplo de um transformador de 112MVA de potência, cujo tipo representa a classe de transformador objeto de estudo deste trabalho.

Figura 6 - Transformador de potência



Fonte: Catálogo WEG (2012).

O coeficiente médio de absorção acústica é utilizado no procedimento de medição, conforme presente na Tabela 1, ele depende do local de teste.

Tabela 1 – Coeficiente médio de absorção acústica

Coeficiente médio de absorção acústica (a)	Descrição da Sala
0,05	Salas quase vazias com paredes duras e lisas. Feitas de concreto, tijolos ou cerâmica.
0,1	Salas parcialmente vazias, com paredes lisas.
0,15	Salas mobiliadas, salas de máquina, ou salas industriais, sendo todas retangulares.
0,2	Salas mobiliadas, salas de máquina, ou salas industriais, sendo todas com forma irregular.
0,25	Salas industriais ou salas de máquinas com teto e/ou paredes parcialmente revestidos de materiais acústicos.
0,35	Sala com teto e paredes revestidos de materiais acústicos.
0,5	Sala com teto e paredes revestidos com grandes quantidades de materiais acústicos.

Fonte: Adaptado NBR 7277 – Transformadores e reatores, determinação do nível de ruído (2013).

3.1 Procedimento de medição de ruído

O procedimento de medição de nível de ruído em transformadores ocorre da seguinte forma:

Dados do transformador:

- Potência do transformador: 112MVA;
- Alta tensão: 400kV;
- Baixa tensão: 13,8kV;
- Conexão: YNd5;
- Corrente HV: 161,65A;
- Corrente LV: 4.685,74A;
- Tipo de refrigeração: OFWF;
- Classe de isolamento: A;
- Peso óleo: 25,5t;
- Peso total: 124,0t.

Instrumentos utilizados na medição:

- Instrumento de medição Bruel & Kjaer, tipo 2236;
- Microfone Bruel & Kjaer, tipo 4188;
- Calibrador acústico Bruel & Kjaer, tipo 4231 (Hz 94dB SPL-1000).

Condições de ensaio:

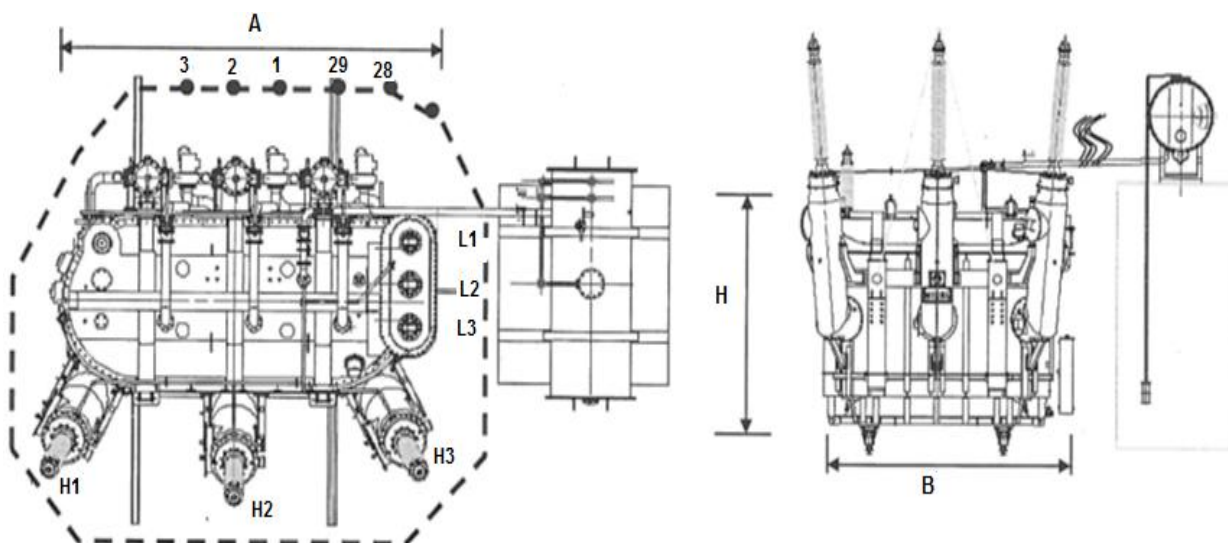
- Tensão de excitação: 13,8kV;
- Frequência: 60Hz;
- Temperatura ambiente: 20°C;
- Umidade: 60%;
- Pressão: 998mbar.

Medidas físicas do transformador:

- Comprimento do transformador: $L = 5.860\text{m}$;
- Largura do transformador: $B = 3,71\text{m}$;
- Altura do transformador: $H = 4,64\text{m}$;
- Comprimento do contorno: $L_m = 29\text{m}$;
- Número posições de medição do microfone: $M(N) = 29$;
- Área total da superfície da sala de teste: $S_v = 10036\text{m}^2$;
- Coeficiente médio de absorção acústico: $a = 0,200$;
- Coeficiente médio de absorção acústica: $A = a S_v = 2072\text{m}^2$;
- Medida da superfície: $S = (H + 2) L_m = 192,56\text{m}^2$;
- Razão: $A/S = 10,76$;
- Área de referência: $S_0 = 1.000\text{m}^2$.

A Figura 7 representa o *layout* dos pontos de medição ao redor do transformador, na qual cada ponto dista um metro do ponto posterior, sendo importante ressaltar que em todo e qualquer laudo técnico referente à medição do nível de pressão acústica em transformadores, é obrigatório um *layout* referente aos pontos nos quais as medições foram realizadas, em caso de salas onde existam demais objetos próximos ao transformador em estudo, torna-se interessante também uma ilustração, ou ilustrações, situando os demais objetos em relação ao transformador.

Figura 7 - Layout de pontos de medição



Fonte: Fabricante (2012).

Dada a Equação 1:

$$L_{pA0} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{pAi}} \right) \quad (1)$$

Onde:

L_{pA0} : Nível de pressão acústica calculada;

L_{pAi} : Nível de pressão acústica medida;

N: Número total de posições de medição.

A média ponderada do nível de pressão acústica de fundo, L_{bgA} , deve ser calculada separadamente antes e depois da sequência de teste utilizando a Equação 2:

$$L_{bgA} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M 10^{0,1 \cdot L_{bgAi}} \right) \quad (2)$$

Onde:

M: Número total de posições de medição;

L_{bgAi} : Nível de pressão acústica de ruído de fundo na posição de medição.

A média corrigida do nível de pressão acústica L_{pA} será calculada usando a Equação 3:

$$L_{pA} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot L_{pA0}} - 10^{0,1 \cdot L_{bgA}}) - K \quad (3)$$

Onde:

L_{pA} : Média corrigida do nível de pressão acústica;

L_{bgA} : Níveis de pressão acústica de ruído de fundo;

K: Fator de correção ambiental.

A correção ambiental K representa a influência do som, reflexões indesejadas, limites da sala ou objetos refletoras próximos do objeto de teste. A magnitude de K depende principalmente da proporção da área de absorção de som de sala de teste (A), para a área da superfície de medição (S). A magnitude calculada de K depende significativamente da localização do objeto de teste na sala de teste. O fator K deve ser obtido a partir da Equação 4, com o valor apropriado (A/S):

$$K = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{4}{\frac{A}{S}}\right) \quad (4)$$

As Equações 1, 2, 3 e 4 são utilizadas para o cálculo do nível de pressão acústica do transformador e para o nível de pressão acústica do ruído de fundo.

O nível de pressão acústica é medido em decibéis (dB), em homenagem a Graham Bell que inventou o aparelho de telefone. Bel representa uma relação logarítmica, porém é empregada a unidade que representa um décimo dela, por ser mais conveniente, essa unidade é chamada decibel e é designada como dB (MENDES, 2007).

A Tabela 2 informa os valores que devem ser utilizados em caso de correção devido à diferença entre o nível de pressão acústica e o nível de pressão acústica de ruído de fundo. Em caso de diferenças fracionárias é necessária a utilização de algum método de arredondamento para obter-se um valor inteiro.

Tabela 2 – Fatores de correção devido a influência do ruído ambiente

Diferença entre o nível de pressão acústica e o nível de pressão acústica do ruído de fundo [dB]	Valor a ser subtraído do nível de pressão acústica [dB]
3	3
4 até 5	2
6 até 8	1
9 até 10	0,5

Fonte: Adaptado NBR 7277 – Transformadores e reatores, determinação do nível de ruído (2013).

3.2 Níveis de ruído tolerados

As normas NBR 10151 e a NR15 estipulam os valores limites para emissão de ruídos e tempo de exposição.

A Tabela 3 é referente à tolerância conforme tempo de exposição de pessoas a níveis de ruído, nela é considerado o ruído do tipo contínuo ou intermitente, entendendo-se por ruído contínuo ou intermitente, todo ruído que não seja de impacto.

Tabela 3 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente

NÍVEL DE RUÍDO DB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA
	PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: Adaptado NR15 – Atividades e operações insalubres.

Não é permitida exposição a níveis de ruído acima de 115[dB] para indivíduos que não estejam adequadamente protegidos.

A NBR 10151 (Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade), também estipula valores limites para níveis de pressão acústica para áreas habitadas. A Tabela 4 deve ser levada em consideração, caso seja necessária à implantação de um transformador, ou qualquer outro equipamento que emita ruídos, em áreas habitadas.

Tabela 4 – Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos

Tipos de área	Diurno[dB]	Noturno[dB]
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: Adaptado NBR 10151 – Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade.

Um aspecto importante para a credibilidade das avaliações de ruído é a certeza de que os valores medidos estão corretos. Com exceção do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), não existe, até o momento, no Brasil, outros laboratórios credenciados por este órgão para realizar calibração em medidores de pressão acústica. Neste caso, é possível apenas conseguir este tipo de certificado entrando em contato com o fabricante do equipamento que por sua vez deverá encaminhar o equipamento para laboratórios fora do país.

3.3 Desvio padrão

O desvio padrão é uma das mais utilizadas medidas de variação de um grupo de dados. Apresenta a vantagem de permitir uma interpretação direta da variação do conjunto de dados, pois o desvio padrão é expresso na mesma unidade que a variável (g, cm, atm...). É representado por “ σ ” conforme a Equação 5:

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum \frac{1}{(n-1)} (xi - média)^2\right)} \quad (5)$$

É possível entender o desvio padrão como uma média dos valores absolutos dos desvios, ou seja, dos desvios considerados todos com sinal positivo, média essa obtida, porém, por um processo bastante elaborado: calcula-se o quadrado de cada desvio, obtendo a média desses quadrados e, depois é obtida a raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios (INFOESCOLA, 2016).

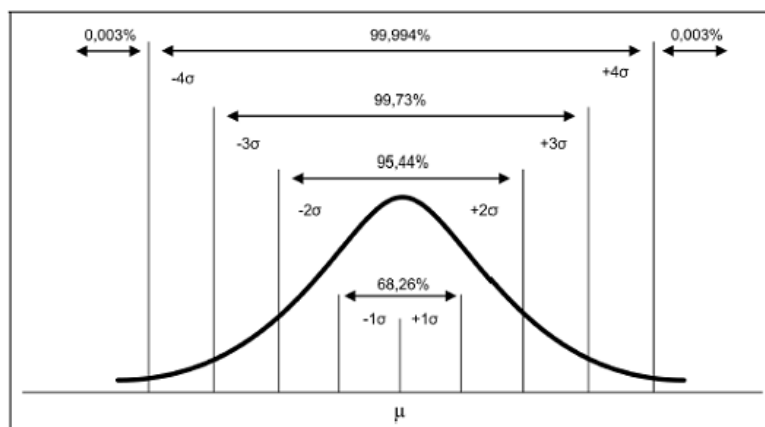
3.3.1 Curva Normal

Embora as distribuições de muitos processos possam assumir uma variedade de formas, muitas variáveis observadas possuem uma distribuição de frequências que é, aproximadamente, uma distribuição de probabilidade Normal.

Probabilidade é a chance real de ocorrer um determinado evento, isto é, a chance de ocorrer uma medida em um determinado intervalo. Por exemplo, a frequência relativa deste intervalo, observada a partir de uma amostra de medidas, é a aproximação da probabilidade, a distribuição de frequências é a aproximação da distribuição de probabilidades.

A distribuição é normal quando tem a forma de sino. Para achar a área sob a curva normal devemos conhecer dois valores numéricos, a média “ μ ” e o desvio padrão “ σ ” (INFOESCOLA, 2016).

Figura 8 - Curva Normal



Fonte: INFOESCOLA (2016).

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados as simulações e os resultados do trabalho.

4.1 Simulações

Para a realização das simulações, foram utilizados dois transformadores de mesma potência, os dados referentes aos transformadores, instrumentos de medição utilizados e condições de ensaio (item 3.1). Estes dados foram obtidos com um fabricante de transformadores.

A Tabela 5 representa uma ficha de ensaio de medição de ruído de um transformador de 112 MVA realizado pelo fabricante, onde estão contidas as medições nos pontos em volta do transformador e também como devem ser preenchidas as fichas de ensaio para este tipo de transformador. As medições do nível de pressão acústica de ruído de fundo devem ser realizadas com o transformador desenergizado, posteriormente as bombas que realizam a circulação do óleo refrigerante do transformador devem ser ligadas e mais uma série de medições deve ser realizada. No estágio final, logo após as bombas serem desligadas, uma última série de medições é realizada.

Para a medição do nível de pressão acústica do transformador, o mesmo deve ser energizado com tensão nominal e sem a presença de cargas, as medições devem ser realizadas à 1/3 e a 2/3 de sua altura (H), pois o mesmo ultrapassa 2,5 metros de altura, como explicado anteriormente, de acordo com o procedimento da norma NBR 7277, transformadores com altura inferior a 2,5 metros necessitam de apenas uma medição à metade de sua altura.

Não é aconselhável realizar medições de ruído em grandes transformadores nos primeiros minutos subsequentes a sua energização, quando esta for efetuada instantaneamente, pois é comum encontrar um valor de pico inicial de corrente várias vezes superior ao da corrente nominal do transformador, podendo interferir nos resultados finais do estudo em questão (WEG S.A., 2010).

Com os dados presentes na Tabela 5 é possível realizar os cálculos, utilizando das equações 1, 2, 3 e 4 para obter os valores finais de L_{pA} (Nível de pressão acústica) e L_{bgA} (Nível de pressão acústica do ruído de fundo).

Tabela 5 – Ficha de ensaio de medição de ruído

MEDIÇÃO DE NÍVEL DE PRESSÃO ACÚSTICA					
Ponto de medição:	LbgA - Nível de pressão acústica de ruído de fundo			LpA - Nível de pressão acústica do transformador	
	Ambiente no início I	Bombas ligadas II	Ambiente no fim III	H/3	2H/3
	1	40,6	51,9	41,3	69,9
2	40,1	52,4	41	66	64,1
3	39,7	52,5	39,8	69,2	62,5
4	39,9	51,3	39,7	68,9	65,9
5	39,6	49,7	39,2	66,9	67,1
6	40	49,3	39,1	65,9	70,1
7	40,2	47,2	39	69,6	64,7
8	39,9	44,5	39,2	66,9	69
9	39,8	43,9	39,3	65,4	65
10	40,1	43,8	39,2	62,4	62,9
11	39,7	43,6	39	64,4	62,8
12	39,9	43,9	39	68	64,9
13	40,3	43,4	39,4	68,1	67,3
14	40,1	44	39,9	67,6	64,6
15	40,4	44,3	40,2	71,9	66,7
16	40,6	45,1	40,6	69,1	67,7
17	40,7	45,4	40,8	65,4	65,9
18	40,9	46	41,2	68,3	63,7
19	41,4	47,2	41,8	65,3	62,5
20	41,8	48,2	42	66,3	69,7
21	42	48,9	42,1	68,2	70
22	42,1	50,4	41,9	67,1	65,2
23	41,9	51,2	41,6	68,6	66,8
24	42,2	51,6	41,2	65,4	66,6
25	41,5	51,7	41,3	69,7	68
26	41,9	51,2	40,8	69,3	68,9
27	41,3	51,5	40,5	70,7	65,5
28	40,6	51,6	40,1	70,2	69,9
29	40,4	51,3	40,2	70	68,9

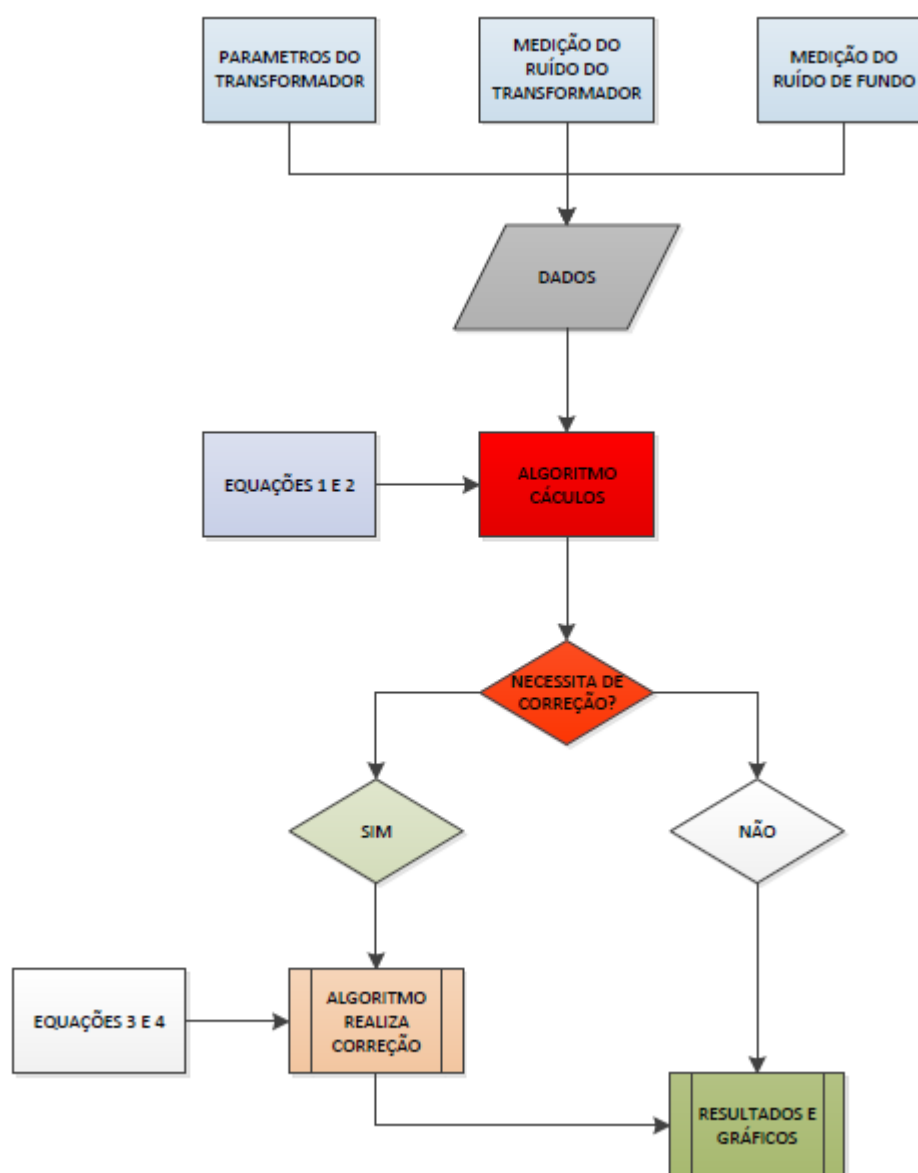
Fonte: Adaptado do fabricante.

O procedimento de cálculo, anteriormente explicado, é repetitivo, exaustivo e sujeito à possíveis erros. Com intuito de diminuir os possíveis erros e diminuir o

tempo gasto com os procedimentos de cálculo, foi desenvolvido via software *MatLab* (*Matrix laboratory*) um algoritmo, no qual são inseridos os dados do transformador e do ensaio de medição de ruído para obter-se como retorno os valores de L_{pA} e L_{bgA} .

A Figura 9 representa o funcionamento do algoritmo desenvolvido, sendo possível notar que, além de realizar os cálculos, o algoritmo também verifica se existe a necessidade de correção e caso exista, ele realiza a mesma, obtendo como resultado os valores de L_{pA} e L_{bgA} , são gerados gráficos referentes aos valores de L_{pA} e L_{bgA} de acordo com os pontos de medição, assim como o valor de L_{pA} de cada transformador, considerando-se o valor de sua potência.

Figura 9 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo



Fonte: Autoria própria

4.2 Resultados

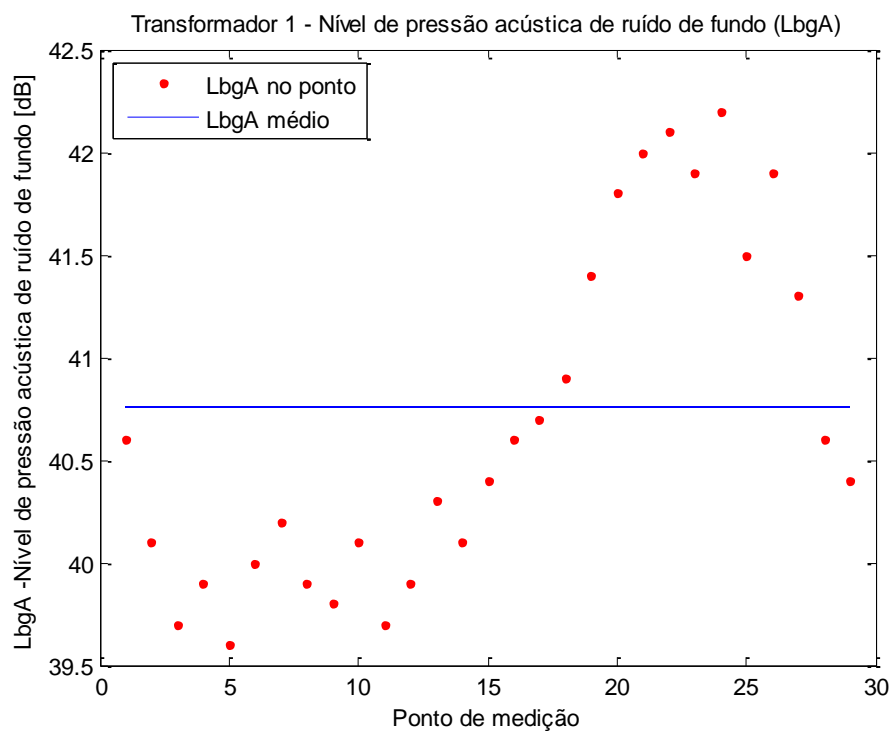
A Tabela 6 representa as entradas fornecidas ao algoritmo e os resultados obtidos. Como é possível notar, o algoritmo recebe como entrada os dados de cada transformador, sendo: a potência do transformador, altura (H), o comprimento de contorno (Lm), o coeficiente de absorção acústica da sala de medição e a área de superfície de contato. O valor do coeficiente de absorção acústica é estipulado conforme as características da sala de ensaio, conforme presente na Tabela 1 (Coeficiente médio de absorção acústica), os dados referentes às medições realizadas também são utilizados, porém os mesmos são fornecidos dentro de documentos de texto (Apêndice C) que são carregados no algoritmo. A partir desses dados são calculados os valores dos níveis de pressão acústica do transformador e do fundo.

Tabela 6 – Entradas e resultados

ENTRADAS		
Transformador:	1	2
Potência [MVA]	112	112
Altura (H) [m]	4,64	4,64
Comp. Cont. Lm [m]	29	29
Coef. Abs. Acúst. (a)	0,2	0,2
Área. Superfície (Sv) [m]	10036	10036
RESULTADOS		
Fat. Corr. Amb. (K)	1,41	1,41
LbgA [dB]	40,756	42,048
LpA [dB]	66,816	66,978

Fonte: Autoria própria

Os resultados das medições também estão representados na forma de gráficos e histogramas, nos quais também foram construídas curvas normais. A Figura 10 representa o nível de pressão acústica de ruído de fundo medido em cada ponto.

Figura 10 - Nível de pressão acústica de ruído de fundo do transformador 1

Fonte: Autoria própria

Como mostrado na Figura 10, o valor médio do nível de pressão acústica de ruído de fundo para o transformador 1 é de 40,76[dB], para obter-se uma maior precisão nesse resultado, também foi calculado o desvio padrão, levando-se em conta os 29 pontos de medição, obtendo-se um valor de desvio de 0,84[dB] para mais ou para menos.

Na Tabela 7 constam os valores dos demais desvios padrões calculados.

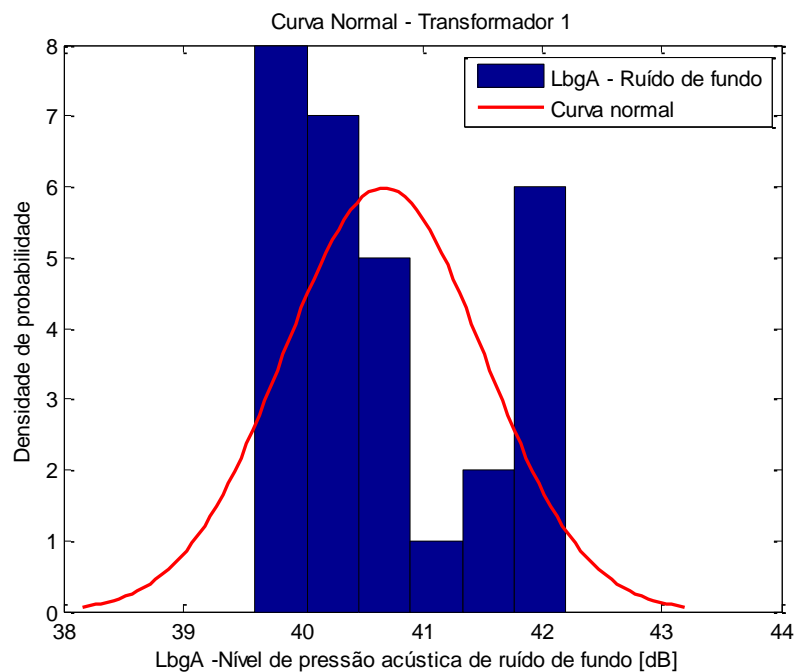
Tabela 7 - Desvio padrão

TRANSFORMADOR:	DESVIO PADRÃO	
	1	2
LbgA[dB]	0,83740	2,16130
LpA[dB]	1,42340	1,98430

Fonte: Autoria própria

A Figura 11 é um histograma com os dados da medição do nível do ruído de fundo do transformador 1, com a curva normal e o ápice da curva é o valor médio do ruído de fundo.

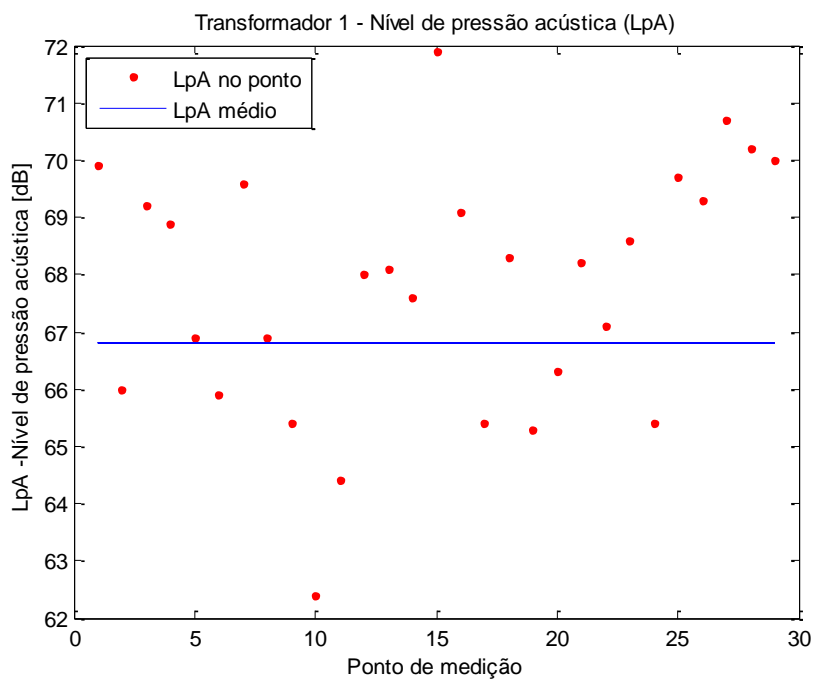
Figura 11 - Curva normal do ruído de fundo do transformador 1



Fonte: Autoria própria

A Figura 12 representa o nível de pressão acústica do transformador 1, o valor médio de L_{pA} do transformador 1 é de 66,82[dB] e o valor do desvio padrão é de 1,42[dB].

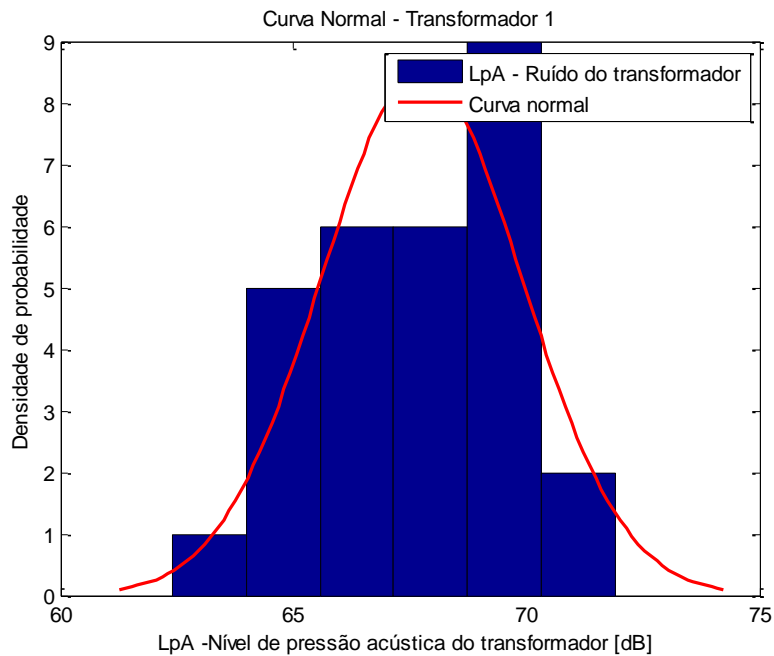
Figura 12 - Nível de pressão acústica do transformador 1



Fonte: Autoria própria

A Figura 13 representa a curva normal para o ruído do transformador 1

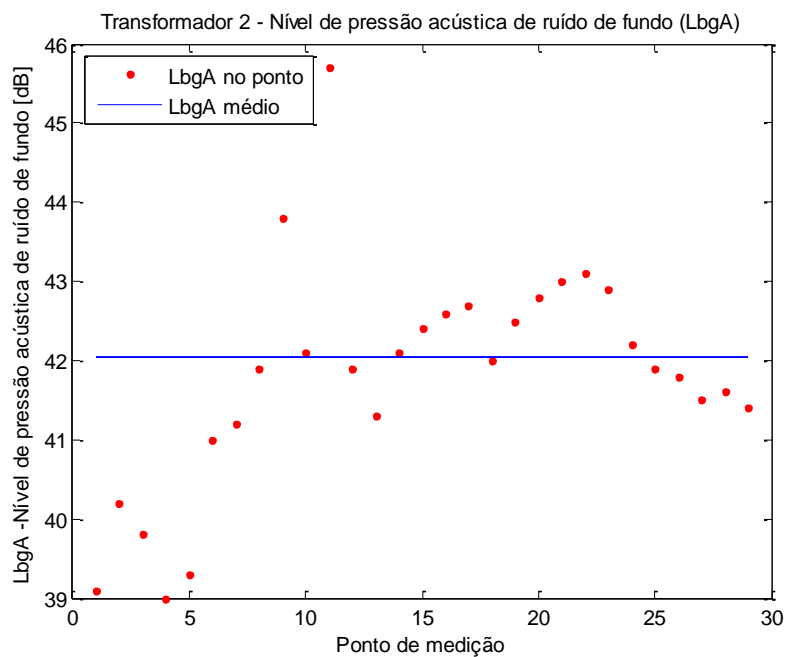
Figura 13 - Curva normal do ruído do transformador 1



Fonte: Autoria própria

Conforme a Figura 14 representa o valor de ruído de fundo do transformador 2, foi obtido valor médio de 42,05[dB] com desvio padrão de 2,16[dB].

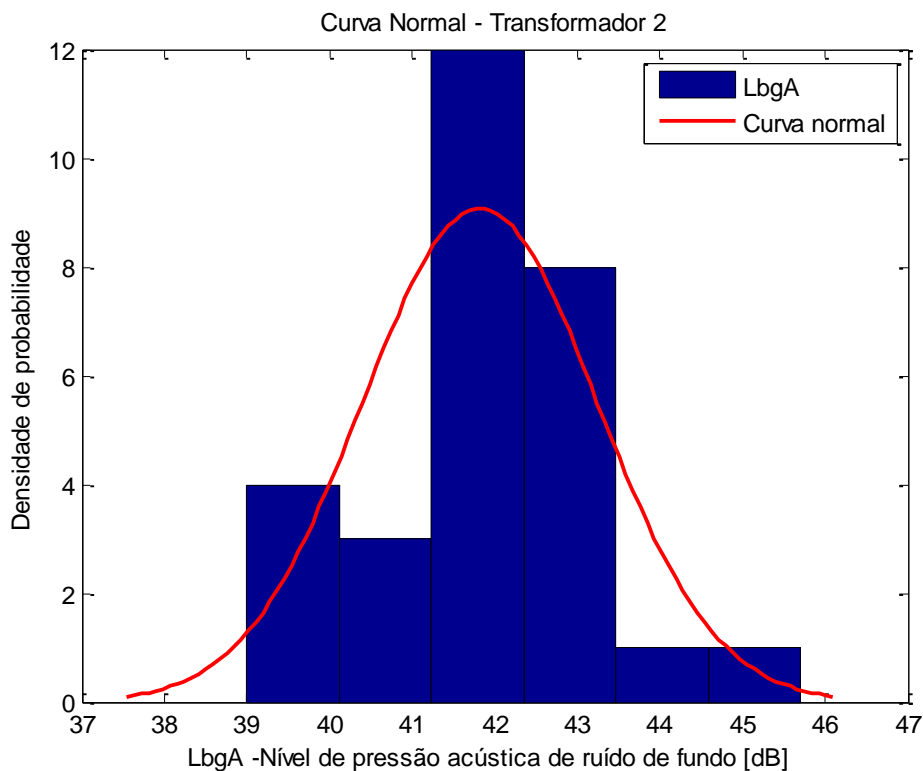
Figura 14 - Nível de pressão acústica de ruído de fundo do transformador 2



Fonte: Autoria própria

No histograma da Figura 15 é possível notar que a maior densidade ocorreu perto do valor médio obtido de 42,05[dB], aumentando a confiabilidade da medição.

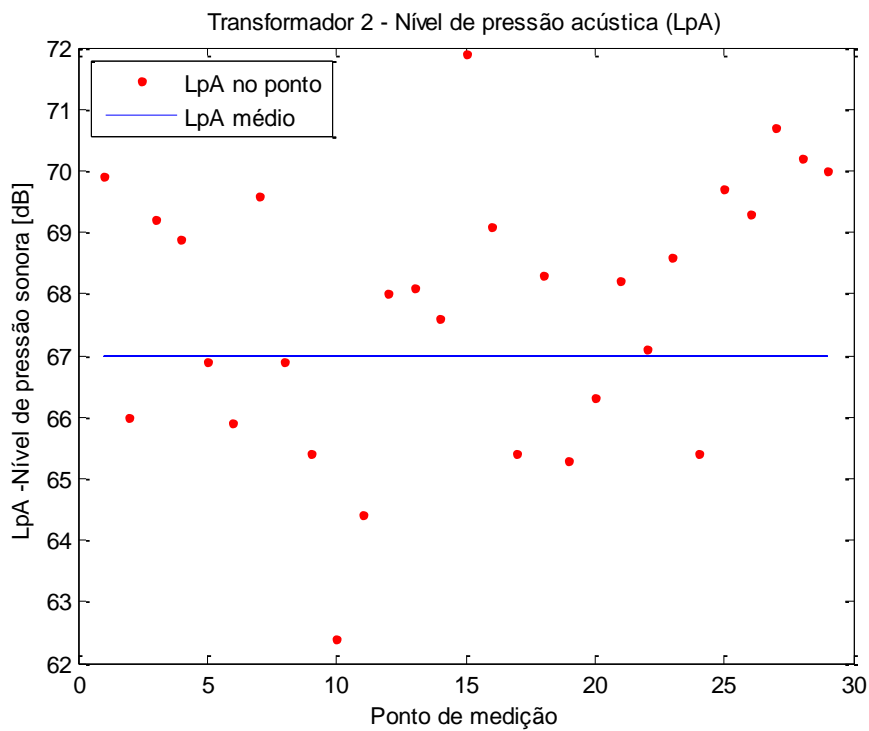
Figura 15 - Curva normal do ruído de fundo do transformador 2



Fonte: Autoria própria

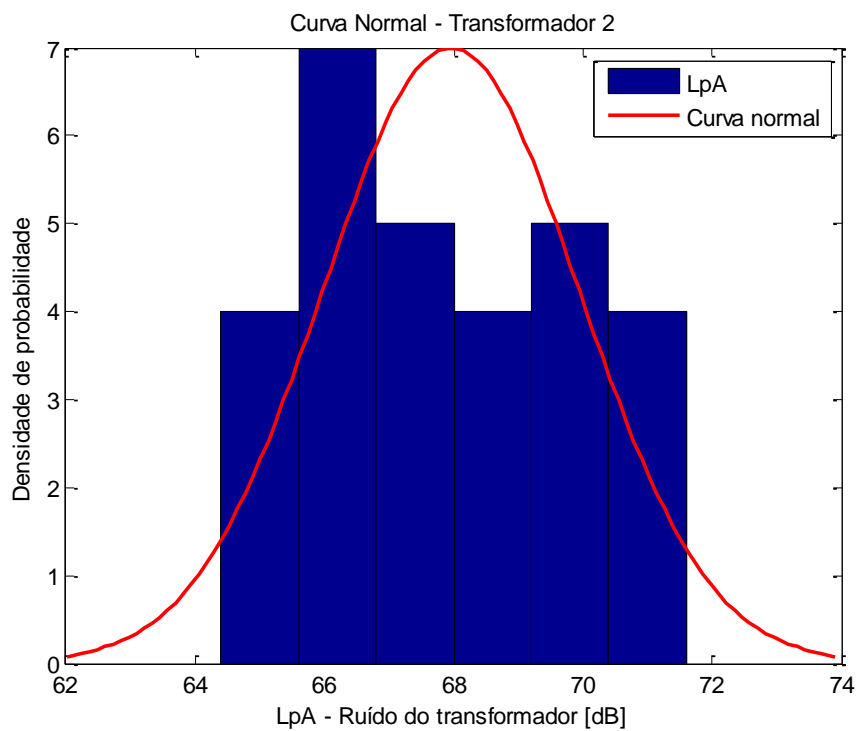
Conforme a Figura 16, o valor para o nível de pressão acústica para o transformador 2 é de 66,98[dB], com desvio padrão de 1,98[dB]. Pode-se inferir da curva normal da Figura 17, que mesmo com um desvio padrão razoável, de aproximadamente 1,98[dB], é possível concluir com uma exatidão de 95,44%, que o valor real do nível de pressão acústica do transformador 2 está entre 65 e 69[dB].

Figura 16 - Nível de pressão acústica do transformador 2



Fonte: Autoria própria

Figura 17 - Curva normal do ruído do transformador 2

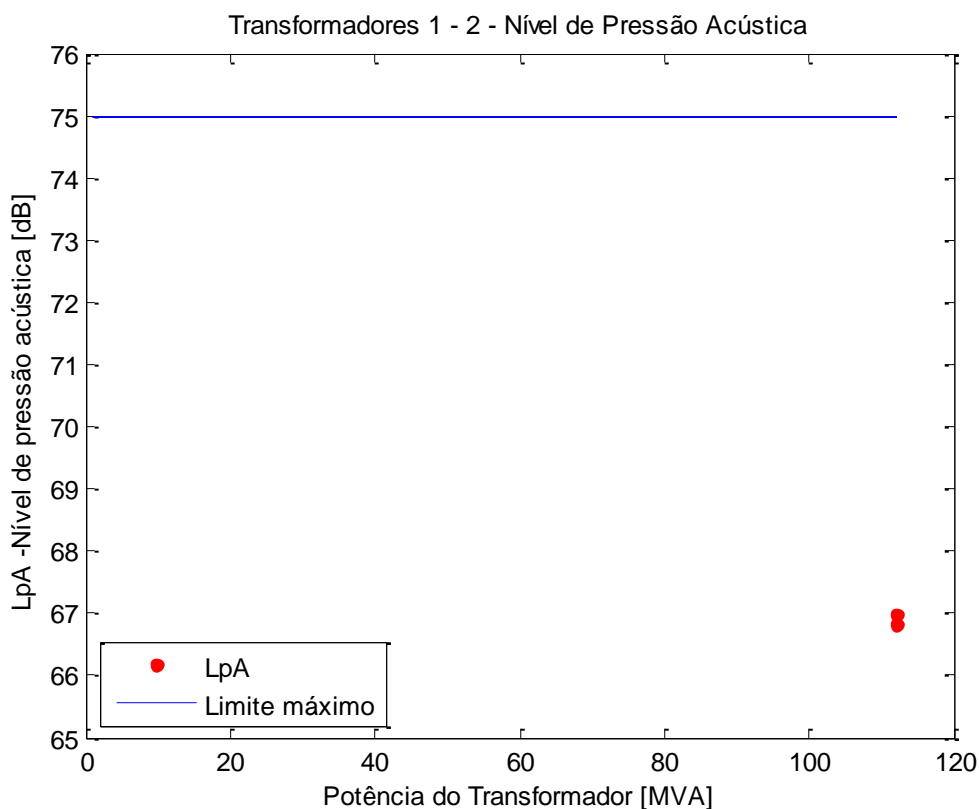


Fonte: Autoria própria

Ambos os transformadores são da mesma classe de potência, comparando-se as duas medições é possível constatar-se que os valores de nível de pressão acústica dos transformadores estão bem próximos, o transformador 1 com 66,82[dB] e o transformador 2 com 66,98[dB], enquanto o valor de nível de pressão acústica de ruído de fundo sofreu uma variação maior de 40,75[dB] para 42,05[dB], tal fato deve-se também a fatores externos como as medições terem ocorrido em dias diferentes, proporcionando condições diferentes. Entretanto, em ambos os casos os valores obtidos estão de acordo com as especificações do fabricante e não infringem nenhuma norma referente a acústica.

A Figura 18 representa os valores de nível de pressão acústica de ambos os transformadores.

Figura 18 - Nível de pressão acústica - LpA



Fonte: Autoria própria

Os valores obtidos ficaram na faixa de 67[dB], considerando a classe de transformadores de potência de 112[MVA], o valor máximo permitido é de 75[dB]. Com isso é possível concluir-se que o nível de pressão acústica de ambos os transformadores em estudo estão de acordo com as normas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são apresentadas as considerações finais deste estudo, e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

5.1 Considerações finais

Neste trabalho foram apresentados conceitos referentes a transformadores de potência, os aspectos construtivos dos mesmos e algumas de suas características, dentre as quais características é possível citar o ruído que o transformador emite em funcionamento, um dos assuntos principais deste trabalho. Com base nesta característica, foram discutidos assuntos referentes às suas causas, sendo a principal o efeito de magnetostricção que consiste em deformações das estruturas cristalinas dos materiais ferromagnéticos presentes no núcleo do transformador, que geram vibrações e por sua vez causam os ruídos nesses tipos de equipamentos.

Apesar dos conceitos abordados neste estudo aplicarem-se à todas as classes de transformadores, divididas de acordo com as suas potências, o foco deste trabalho é a classe de transformadores de alta potência, compreendendo-se nesta classe transformadores de potência igual ou superior a 1.000kVA. É possível dizer que esta classe de transformadores é pouco abordada se comparada as demais classes (transformadores de baixa e média potência), isso ocorre devido ao fato de que ainda existem poucos transformadores de alta potência. Esses transformadores são geralmente construídos apenas por encomenda e são utilizados apenas em casos de necessidade de atendimento de grande demanda de carga. Suas dimensões físicas podem chegar a valores não usuais, que dificultam sua fabricação e transporte, mesmo assim a importância destes equipamentos não deve ser menosprezada.

O ruído produzido por estas máquinas é diretamente proporcional à magnitude de sua potência, que quanto maior, maior o nível de ruído, deste modo, tais transformadores produzem um ruído de magnitude maior que os das classes inferiores. Apesar de não haver diferenças nos procedimentos de medição do ruído nos transformadores, as alterações nas dimensões dos mesmos causam maior

complexidade nos cálculos realizados para obterem-se os níveis de ruído, o que torna o procedimento de cálculo mais suscetível a erros.

Um algoritmo elaborado via *MatLab* é apresentado neste trabalho, como solução a possíveis erros de cálculo e para facilitar e reduzir esse processo exaustivo e cansativo. Este algoritmo recebe como entrada os dados dos transformadores e os valores obtidos em ensaios de medição de ruído, realizando todos os cálculos e também comparações e correções, caso necessárias, apresentando os resultados em forma de valores e gráficos, com os quais é possível a comparação com valores estipulados por normas reguladoras e especificações dos fabricantes. Deste modo é possível detectar irregularidades nesses equipamentos, tendo como parâmetro o ruído emitido pelos mesmos. Ambos transformadores analisados neste trabalho apresentaram níveis de ruídos que atendem às especificações do fabricante e não infringem as normas referentes à esses níveis.

5.2 Trabalhos futuros

O foco deste trabalho foi o processo de medição e análise do ruído emitido por transformadores de alta potência, considerando-se os valores estipulados por normas reguladoras, notando que estes equipamentos podem emitir um nível de ruído acima do tolerado, tornando-se interessante a busca por estudos referentes à diminuição ou cancelamento dos níveis de ruído. Existem técnicas e procedimentos que auxiliam na redução desses níveis, tais como posicionamento físico do transformador com intuito de não provocar a ampliação do ruído emitido, cancelamento passivo de ruídos promovido por barreiras acústicas e até mesmo o cancelamento ativo de ruídos, realizado através do processamento digital de sinais, utilizando sensores e atuadores, que de forma simplificada, medem o sinal gerado pelo ruído e emitem um sinal reverso com intuito de anular o sinal medido, cancelando-se assim o ruído emitido pelo equipamento.

REFERÊNCIAS

ANSI/IEEE C57.12.00, “**IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers**”, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-3: **Transformador de Potência**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7277: **Transformadores e reatores – determinação do nível de ruído**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10151: **Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade**. Rio de Janeiro, 2000.

BRUEL & KJAER. **Catálogo de produtos, instrumentos de medição**. Disponível em: <<http://www.bksv.co.uk/ServiceCalibration/Support/UKFaq/2236Meter2237Meter2238Meter>> Acesso em: 30 Setembro 2016.

CHARLES, J.G.. **The effect of the level of magnetostriction upon noise & vibration of model single-phase transformer**. Electrical Research Association (ERA), 1967.

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

DREAMSTIME, **Ventilador de transformador**. Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-ventilador-de-refrigeracao-image80009961>> Acesso em: 15 Janeiro 2017.

FINOCCHIO, Marco A. F.; FERREIRA, Jeferson G.; DESTRO, Jancer F. Z. **Atenuação das Causas Geradoras de Ruído em Transformadores**. Seminário de Extensão e Inovação da UTFPR – 4º. SEI – UTFPR, 2014.

FINOCCHIO, Marco A. F.; DESTRO, Jancer F. Z; FERREIRA, Jeferson G. **Ruído em transformadores de distribuição da classe 15kv em função da indução do núcleo**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Fortaleza, CE, 2015.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY JR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas – com introdução a Eletrônica de Potência**. Bookman. 6ª ed., Porto Alegre, 2006.

GARNER, K.; BERNESJO, M.; ANGER, J.; CHU, D. **Measuring No – Load and Load noise of Power Transformers using the Sound Pressure and Sound Intensity Methods – Part – II: Indoors measurements**. Conferência científica, “Power and Energy Society General Meeting”, Pitsburgo, 2008.

GIRGIS, R. S.; GARNER K. ; BERNESJO M.; ANGER, J.. **Measuring No – Load and Load noise of Power Transformers using the Sound Pressure and Sound Intensity Methods – Part – I: Outdoors measurements**, Conferência científica “Power and Energy Society General Meeting”, Pitsburgo, 2008.

INFOESCOLA. **Variância e desvio padrão**. Disponível em:
<<http://www.infoescola.com/estatistica/variancia-e-desvio-padrao/>> Acesso em: 11 Janeiro 2017.

MARTIGNONE, Alfonso. **Transformadores**. 8. Ed. São Paulo: Globo, 1991.

MENDES, R. **Patologia do Trabalho**. 2. Ed. São Paulo: Atheneu, 2007.

NORMA REGULAMENTADORA 15, **Atividades e operações insalubres**, 1978.

SIEMENS S.A. **Catalogo técnico – Transformadores de Força**. Siemens Jundiaí, SP, 2007.

SIMONE, G. A. **Transformadores – Teoria e Exercícios**. São Paulo, Érica, 1998.

UNIVERTEC. **Aspectos construtivos dos transformadores de potência.** Disponível em: <http://univertecefetmg.blogspot.com.br/2013/11/toshiba-transformadores-aspectos_19.html>. Acesso em: 12 Janeiro 2017.

WEG Transformadores. **Catálogo Técnico.** Itajaí, 2012.

WEG S.A. **Características e especificações de transformadores de distribuição e força DT-11.** Blumenau, SC, 2010.

ZAWIESKA, W. M.. **A Power Transformer as a Source of Noise.** *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, pp. 381–389, Vol 13, No 4, 2007.

APÊNDICE A – Algoritmo criado via *MatLab*

%% PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DE RUÍDO EM TRANSFORMADORES DE ALTA POTÊNCIA

% EDUARDO HIROSHI NOGUEIRA NAZU
% UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
% CORNÉLIO PROCÓPIO 2017

%Comandos de inicialização.
 clc;
 close all;
 clear all;

%% Dados do transformador:

% H - Altura;
 % Lm - Comprimento do contorno;
 % a - Coeficiente de absorção acústica;
 % Sv - Área total da sala de superfície de teste;
 % A - Coeficiente médio de absorção acústica;
 % S - Medida real da superfície;
 % R - Razão A/S;
 % K - Fator de correção ambiental;

%% Carrega as matrizes com os dados de medição

M(:, :, 1) = load('Dados.txt'); % carrega a matriz M, com os dados das medições.
 M(:, :, 2) = load('Dados2.txt');

%% Declaração dos parametros da função ruído.

Pot=[112, 112]; %Vetor com a potencia dos transformadores
 H = [4.64,4.64]; %Vetor com a altura dos transformadores
 Lm = [29,29]; %Vetor com o comprimento de contorno dos transformadores
 a = [0.2,0.2]; %Vetor com o coeficiente de absorção acústica da sala
 Sv = [10036, 10036]; %Vetor com a area total da sala de superfície de teste

%% Laço de repetição da função ruido, de acordo com o número de tranformadores

E = 2; % Número de transformadores;
 for k = 1:E
 [LpA(k), LbgA(k)] = ruido(H(k), Lm(k), a(k), Sv(k), M(:, :, k))
 end

% LpA0 - Nível de pressão acústica calculada;
 % LpA - Nível de pressão acústica medida;
 % LpAi - Nível de pressão acústica medida na posição i;
 % N - Número total de posições de medição;

%% // Plotagem gráfica //////////////////////////////////////

%// Transformador 1 //////////////////////////////////////

% Posição X LbgA

```
figure (1)
plot(M(:,1,1),'r.')
hold on
plot(ones(size(M,1)).*LbgA(1),'-b');
title('Transformador 1 - Nível de pressão acústica de ruído de fundo (LbgA)');
xlabel('Ponto de medição');
ylabel('LbgA -Nível de pressão acústica de ruído de fundo [dB] ');
legend('LbgA no ponto','LbgA médio','Location','NorthWest');
print('figure 1','-dmeta')
```

% Posição X Lpa

```
figure (2)
plot(M(:,4,1),'r.');
hold on
plot(ones(size(M,1)).*LpA(1),'-b');
title('Transformador 1 - Nível de pressão acústica (LpA)');
xlabel('Ponto de medição');
ylabel('LpA -Nível de pressão acústica [dB] ');
legend('LpA no ponto','LpA médio','Location','NorthWest');
print('figure 2','-dmeta')
```

%// Transformador 2 //////////////////////////////////////

% Posição X LbgA

```
figure (3)
plot(M(:,1,2),'r.');
hold on
plot(ones(size(M,1)).*LbgA(2),'-b');
title('Transformador 2 - Nível de pressão acústica de ruído de fundo (LbgA)');
xlabel('Ponto de medição');
ylabel('LbgA -Nível de pressão acústica de ruído de fundo [dB] ');
legend('LbgA no ponto','LbgA médio','Location','NorthWest');
print('figure 3','-dmeta')
```

% Posição X Lpa

```
figure (4)
plot(M(:,4,1),'r.');
hold on
plot(ones(size(M,1)).*LpA(2),'-b');
```



```

title('Transformador 2 - Nível de pressão acústica (LpA)');
xlabel('Ponto de medição');
ylabel('LpA -Nível de pressão sonora [dB] ');
legend('LpA no ponto','LpA médio','Location','NorthWest');
print('figure 4','-dmeta')

```

```
% Pôtenca X Lpa
```

```
LpAmax = 75;% Valor máximo de ruído em dB para o transformador de 112 MVA
```

```

figure (5)
plot (Pot,LpA,'r.','MarkerSize',16);
hold on
plot (ones(max(Pot)).*LpAmax,'b-')
title('Transformadores 1 - 2 - Nível de Pressão Acústica');
xlabel('Potência do Transformador [MVA]');
ylabel('LpA -Nível de pressão acústica [dB] ');
legend('LpA','Limite máximo ','Location','SouthWest');
set(gca, 'YLim', [ 65 76 ]);
print('figure 5','-dmeta');

```

%% Histogramas e curvas normais

```

figure (6)
histfit(M(:,1),1)
title('Curva Normal - Transformador 1');
xlabel('LbgA -Nível de pressão acústica de ruído de fundo [dB] ');
ylabel('Densidade de probabilidade');
legend('LbgA - Ruído de fundo','Curva normal');
print('figure 6','-dmeta');
hold on

```

```

figure (7)
histfit(M(:,4),1)
title('Curva Normal - Transformador 1');
xlabel('LpA -Nível de pressão acústica do transformador [dB] ');
ylabel('Densidade de probabilidade');
legend('LpA - Ruído do transformador','Curva normal');
print('figure 7','-dmeta');
hold on

```

```

figure (8)
histfit(M(:,1),2)
title('Curva Normal - Transformador 2');
xlabel('LbgA -Nível de pressão acústica de ruído de fundo [dB] ');
ylabel('Densidade de probabilidade');
legend('LbgA','Curva normal');
print('figure 8','-dmeta');
hold on

```

```
figure (9)
histfit(M(:,4,2))
title('Curva Normal - Transformador 2');
xlabel('LpA - Ruído do transformador [dB]');
ylabel('Densidade de probabilidade');
legend('LpA','Curva normal');
print('figure 9','-dmeta');
hold on
```

APÊNDICE B – Função criada via *MatLab*

Função para cálculo de LpA e LbgA:

```

function[LpA, LbgA] = ruido(H, Lm, a, Sv, M)
%%Função utilizada para calcular nível de ruído em transformadores
% H - Altura;
% Lm - Comprimento do contorno;
% a - Coeficiente de absorção acústica;
% Sv - Área total da sala de superfície de teste;
% A - Coeficiente médio de absorção acústica;
% S - Medida real da superfície;
% R - Razão A/S;
% K - Fator de correção ambiental;
S = (H+2)*Lm;
A = a*Sv;
R = A/S;
K=10*log10((4/R)+1)
N = size(M,1)%valor de N é o número de pontos de medição
%% Cálculo LpA0

% LpAi - Nível de pressão acústica medida na posição i;
% LpA0 - Nível de pressão acústica calculada;
% N - Número total de posições de medição;

sum = 0;
for j=1:N
    sum = sum + 10^(0.1*M(j,4));
end
LpA0 = 10*log10(sum/N)
%% Cálculo LbgA

% LbgA- Nível de pressão de ruído de fundo;
% LbgAi- Nível de pressão de ruído defundo na posição i;

sum = 0;
for j=1:N
    sum = sum + 10^(0.1*M(j,1));
end
desvio = std(M)
LbgA = 10*log10(sum/N)

%% Condição de correção do LpA, se a variação LpA0 - LbgA(max) for maior que
8db, Então, é necesssário uma correção.

LbgAMax= max(M(:,1))
if (LpA0-LbgAMax)>=8;
%% Cálculo LpA

% LpA - Nível de pressão acústica corrigida;
LpA = 10*log10(10^(0.1*LpA0)-10^(0.1*LbgA))-K
end

```

APÊNDICE C – Dados em formato txt

Dados do transformador 1 :

40.6	51.9	41.3	69.9	67.3
40.1	52.4	41	66	64.1
39.7	52.5	39.8	69.2	62.5
39.9	51.3	39.7	68.9	65.9
39.6	49.7	39.2	66.9	67.1
40	49.3	39.1	65.9	70.1
40.2	47.2	39	69.6	64.7
39.9	44.5	39.2	66.9	69
39.8	43.9	39.3	65.4	65
40.1	43.8	39.2	62.4	62.9
39.7	43.6	39	64.4	62.8
39.9	43.9	39	68	64.9
40.3	43.4	39.4	68.1	67.3
40.1	44	39.9	67.6	64.6
40.4	44.3	40.2	71.9	66.7
40.6	45.1	40.6	69.1	67.7
40.7	45.4	40.8	65.4	65.9
40.9	46	41.2	68.3	63.7
41.4	47.2	41.8	65.3	62.5
41.8	48.2	42	66.3	69.7
42	48.9	42.1	68.2	70
42.1	50.4	41.9	67.1	65.2
41.9	51.2	41.6	68.6	66.8
42.2	51.6	41.2	65.4	66.6
41.5	51.7	41.3	69.7	68
41.9	51.2	40.8	69.3	68.9
41.3	51.5	40.5	70.7	65.5
40.6	51.6	40.1	70.2	69.9
40.4	51.3	40.2	70	68.9

Dados do transformador 2:

39.1	53.2	42.2	71	66.1
40.2	52.8	42.2	69.8	65.4
39.8	52.8	40.9	69.7	64.7
39	51.8	40.8	68.5	66.8
39.3	52	40.6	67.9	68.2
41	52.4	40.3	67.9	69.4
41.2	51.4	39.8	68.6	69.9
41.9	49.5	39.5	67.9	70.1
43.8	48.9	39.4	66.4	70.3
42.1	47.8	38.3	64.4	68.5
45.7	47.5	38.1	65.4	67.9
41.9	47.9	38.3	66.1	68.8
41.3	47.4	38.5	66.2	68.6
42.1	46	39.6	67.6	68.5
42.4	46.2	40.1	69.6	69.9
42.6	46.3	40.7	69.5	67.9
42.7	46.5	40.8	65.2	66.6
42	46.2	41.3	68.5	66.6
42.5	46.6	41.5	65.5	66.4
42.8	46.5	42	66.2	64.2
43	47.4	42.1	67.4	68.5
43.1	48.7	41.7	66.3	69.6
42.9	49.2	41.8	66.7	67.9
42.2	50.2	42.1	66.3	68.4
41.9	51.1	41.9	68.8	69.3
41.8	52.1	41.5	69.8	70.1
41.5	52.3	41.4	70.7	68.9
41.6	52.7	41.1	71.3	67.8
41.4	52.6	41.3	71.6	67.8

ANEXO A – Fichas de medições realizadas pelo fabricante

LOGO EMPRESA	Local	Transformador: 1			Relatório de Teste	
					Folhas n°:	
					Folha n°:	
Plano de Posição	Níveis de pressão sonora ponderados do ruído de fundo L_{bgAi}			Plano de Posição	Níveis de pressão sonora ponderados L_{pAi}	
	No início I	Ambiente +Bombas II	No final III		As medições na altura do tanque	
					H/3m	2H/3m
1	40,6	51,9	41,3	1	69,9	67,3
2	40,1	52,4	41,0	2	66,0	64,1
3	39,7	52,5	39,8	3	69,2	62,5
4	39,9	51,3	39,7	4	68,9	65,9
5	39,6	49,7	39,2	5	66,9	67,1
6	40,0	49,3	39,1	6	65,9	70,1
7	40,2	47,2	39,0	7	69,6	64,7
8	39,9	44,5	39,2	8	66,9	69,0
9	39,8	43,9	39,3	9	65,4	65,0
10	40,1	43,8	39,2	10	62,4	62,9
11	39,7	43,6	39,0	11	64,4	62,8
12	39,9	43,9	39,0	12	68,0	64,9
13	40,3	43,4	39,4	13	68,1	67,3
14	40,1	44,0	39,9	14	67,6	64,6
15	40,4	44,3	40,2	15	71,9	66,7
16	40,6	45,1	40,6	16	69,1	67,7
17	40,7	45,4	40,8	17	65,4	65,9
18	40,9	46,0	41,2	18	68,3	63,7
19	41,4	47,2	41,8	19	65,3	62,5
20	41,8	48,2	42,0	20	66,3	69,7
21	42,0	48,9	42,1	21	68,2	70,0
22	42,1	50,4	41,9	22	67,1	65,2
23	41,9	51,2	41,6	23	68,6	66,8
24	42,2	51,6	41,2	24	65,4	66,6
25	41,5	51,7	41,3	25	69,7	68,0
26	41,9	51,2	40,8	26	69,3	68,9
27	41,3	51,5	40,5	27	70,7	65,5
28	40,6	51,6	40,1	28	70,2	69,9
29	40,4	51,3	40,2	29	70,0	68,9

LOGO EMPRESA	Local	Transformador : 2			Relatório de Teste	
					Folhas n ^o :	
					Folha n ^o :	
Plano de Posição	Níveis de pressão sonora ponderados do ruído de fundo L _{bgAi}			Plano de Posição	Níveis de pressão sonora ponderados L _{pAi}	
	No início I	Ambiente +Bombas II	No final III		As medições na altura do tanque	
					H/3m	2H/3m
1	39,1	53,2	42,2	1	71,0	66,1
2	40,2	52,8	42,2	2	69,8	65,4
3	39,8	52,8	40,9	3	69,7	64,7
4	39,0	51,8	40,8	4	68,5	66,8
5	39,3	52,0	40,6	5	67,9	68,2
6	41,0	52,4	40,3	6	67,9	69,4
7	41,2	51,4	39,8	7	68,6	69,9
8	41,9	49,5	39,5	8	67,9	70,1
9	43,8	48,9	39,4	9	66,4	70,3
10	42,1	47,8	38,3	10	64,4	68,5
11	45,7	47,5	38,1	11	65,4	67,9
12	41,9	47,9	38,3	12	66,1	68,8
13	41,3	47,4	38,5	13	66,2	68,6
14	42,1	46,0	39,6	14	67,6	68,5
15	42,4	46,2	40,1	15	69,6	69,9
16	42,6	46,3	40,7	16	69,5	67,9
17	42,7	46,5	40,8	17	65,2	66,6
18	42,0	46,2	41,3	18	68,5	66,6
19	42,5	46,6	41,5	19	65,5	66,4
20	42,8	46,5	42,0	20	66,2	64,2
21	43,0	47,4	42,1	21	67,4	68,5
22	43,1	48,7	41,7	22	66,3	69,6
23	42,9	49,2	41,8	23	66,7	67,9
24	42,2	50,2	42,1	24	66,3	68,4
25	41,9	51,1	41,9	25	68,8	69,3
26	41,8	52,1	41,5	26	69,8	70,1
27	41,5	52,3	41,4	27	70,7	68,9
28	41,6	52,7	41,1	28	71,3	67,8
29	41,4	52,6	41,3	29	71,6	67,8