

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ YAMASHITA BARBOSA

Estudo de ruído em transformadores a seco encapsulados

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

LUIZ YAMASHITA BARBOSA

Estudo de ruído em transformadores a seco encapsulados

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista do Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luiz Yamashita Barbosa

Estudo de ruído em transformadores a seco encapsulados

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:00hs do dia 08/06/2017 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). Me(a). Jancer Frank Zanini Destro - (Membro)

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

Dedico esse trabalho a Deus por tornar
tudo possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor meu Deus e meu Pai Eterno pela saúde e força para superar todas as dificuldades.

Agradeço ao meu falecido avô Masao Yamashita pelos valores e conhecimentos, por ter sido como um pai que sempre apoiou e acreditou em mim.

Agradeço aos meus pais, irmãos e parentes pelo apoio, conselhos e incentivos.

Agradeço a todos os professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio, em especial ao meu orientador Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio pela dedicação, confiança e paciência com a qual me orientou, aos professores da banca examinadora, Prof. Dr. Luiz Marcelo Chiesse da Silva e Prof. Me. Jancer Frank Zanini Destro e ao professor suplente Prof. Me. João César de Paula Salve por toda atenção e contribuição dedicada a este trabalho.

Agradeço a todos que de alguma forma me auxiliaram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

" Aprender é a única coisa de que
a mente nunca se cansa, nunca tem medo
e nunca se arrepende."

- Leonardo da Vinci

RESUMO

BARBOSA, Luiz Yamashita. **Estudo de ruído em transformadores a seco encapsulados** 2017. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Este trabalho tem como objetivo apontar as principais fontes geradoras de ruído em transformadores a seco encapsulados, os processos necessários para execução dos ensaios dentro do laboratório do fabricante como estabelecidos pela NBR 7277/2013, e o desenvolvimento de um algoritmo para simulações de níveis de ruído de transformadores através de seus aspectos construtivos, mostrando como o ruído se comporta mediante variação da indução magnética na chapa do núcleo. O comparativo entre os valores encontrados foi realizado, com o algoritmo desenvolvido e os valores medidos no laboratório do fabricante, verificando sua eficiência e validade de acordo com valores exigidos pela NBR 10295-11.

Palavras-chave: Transformadores a seco. Análise de Ruídos. Fontes Geradoras de Ruído.

ABSTRACT

YAMASHITA, Luiz Yamashita. **Study of noise in dry type transformers** 2017. 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

This work aims to study the main sources of noise in Dry Type Transformer, the processes required for carrying out the tests in the manufacturer's laboratory as set by the NBR 7277/2013. Develop an algorithm for simulation of noise levels transformers through its constructive aspects, showing how noise behaves by varying the magnetic induction in the core plate. Make the comparison between the values obtained with the developed algorithm and the values measured in the manufacturer's laboratory, checking its efficiency and the values are consistent with those required by the NBR 10295-11.

Keywords: Dry Type Transformers. Noise Analysis. Generating Sources of Noise.

.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fontes de ruído em transformadores a seco.....	16
Figura 2- Micrografia de uma chapa de FeSi com GNO.....	20
Figura 3 - Micrografia de uma chapa de FeSi com GO	22
Figura 4 - Frequência da rede x frequência do ruído	23
Figura 5 - Campo magnético em um material ferromagnético.....	24
Figura 6 - Primeiro transformador moderno prático.....	25
Figura 7 - Representação esquemática de um transformador	28
Figura 8 - Representação de um transformador ideal	30
Figura 9 - Representação das perdas Joule do transformador	31
Figura 10 - Representação da dispersão no transformador	31
Figura 11 - Representação das perdas no ferro do transformador.....	32
Figura 12 - Representação da permeabilidade do fluxo do transformador.....	32
Figura 13 - Representação da permeabilidade do fluxo do transformador.....	33
Figura 14 - Enrolamento de um transformador a seco	38
Figura 15 - Núcleo de um transformador.....	39
Figura 16 - Perfis das juntas do núcleo do transformador	40
Figura 17 - Acessórios complementares	41
Figura 18 - A propagação de uma onda ao nível de partícula.....	43
Figura 19 - Espectro de ruído do transformador.....	46
Figura 20 - Nível de ruído medido no núcleo do transformador	47
Figura 21 - Ressonância no núcleo do transformador.....	47
Figura 22 - Equipamentos auxiliares de refrigeração	48
Figura 23 - Painel de controle de temperatura	49
Figura 24 - Nível de ruído dos equipamentos auxiliares de refrigeração.....	50
Figura 25 - Posições típicas dos microfones para a medição de ruído em transformadores a seco.....	51
Figura 26 - Vista frontal das posições típicas dos microfones para a medição de ruído em transformadores a seco.....	52
Figura 27 - Diagrama de bloco do funcionamento do algoritmo	53
Figura 28 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 45kVA	54
Figura 29 -Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 75kVA	55
Figura 30 -Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 112,5kVA	56

Figura 31 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 150kVA	57
Figura 32 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 225kVA	58
Figura 33 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 300kVA	59
Figura 34 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 45kVA	61
Figura 35 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 75kVA	62
Figura 36 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 112,5kVA.....	64
Figura 37 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 150kVA	65
Figura 38 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 225kVA	67
Figura 39 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 300kVA	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Normas	27
Tabela 2 – Transformadores a óleo x transformadores a seco	35
Tabela 3 – Níveis de ruídos para transformadores a seco	42
Tabela 4 – Valores de ruído medido para o transformador de 45kVA.....	60
Tabela 5 – Valores de ruído medido para o transformador de 75kVA.....	62
Tabela 6 – Valores de ruído medido para o transformador de 112,5kVA.....	63
Tabela 7 – Valores de ruído medido para o transformador de 150kVA.....	65
Tabela 8 – Valores de ruído medido para o transformador de 225kVA.....	66
Tabela 9 – Valores de ruído medido para o transformador de 300kVA.....	68

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Resfriamento natural a ar sem invólucro
ANAN	Resfriamento natural a ar com invólucro
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CA	Corrente Alternada
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Db	Decibéis
GNO	Grão não Orientado
GO	Grão Orientado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
NBR	Norma Brasileira
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
TRIP	Comando de desligamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Metodologia de pesquisa	18
1.3	Organização da monografia	18
2	AÇOS ELÉTRICOS E MAGNETOSTRIÇÃO	19
2.1	Aços elétricos	19
2.1.1	Tipos e propriedades dos aços elétricos	19
2.1.2	Aços de baixo carbono	19
2.1.3	Aços de grão não orientado	20
2.1.4	Aços de grão orientado	21
2.2	Magnetostricção	22
3	TRANSFORMADOR DE ENERGIA ELÉTRICA	25
3.1	Introdução	25
3.2	Conceitos básicos e normatizações	26
3.3	Princípio de funcionamento	27
3.4	Transformador ideal	29
3.5	Modelo equivalente do transformador real	30
3.6	Transformadores a seco	33
3.7	Características construtivas do transformador a seco	37
3.7.1	Parte ativa	37
3.7.2	Acessórios Complementares	41
4	SOM E RUÍDO	42
4.1	Propagação do som	43
4.2	Pressão sonora	43
4.3	Potência acústica emitida pelo transformador	44
4.4	Fontes geradoras de ruído em transformadores a seco	45
4.4.1	Ruído do Núcleo do Transformador	46
4.4.2	Ruído Causado por Forças Eletromagnéticas	48
4.4.3	Sistema de refrigeração e seus ruídos	48

4.5 Procedimentos de medições de ruídos	50
5 SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES	53
5.1 Simulações	53
5.2 Medições	59
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHO FUTUROS	70
6.1 Considerações finais	70
6.2 Sugestões para trabalho futuros	71
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

O transformador é um dispositivo que, por meio da ação de um campo magnético, converte a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão (CHAPMAN, 2012).

Um aspecto presente e frequentemente negligenciado no funcionamento do transformador elétrico é o ruído produzido pela sua operação que constitui uma fonte de poluição sonora, requisito importante deste equipamento.

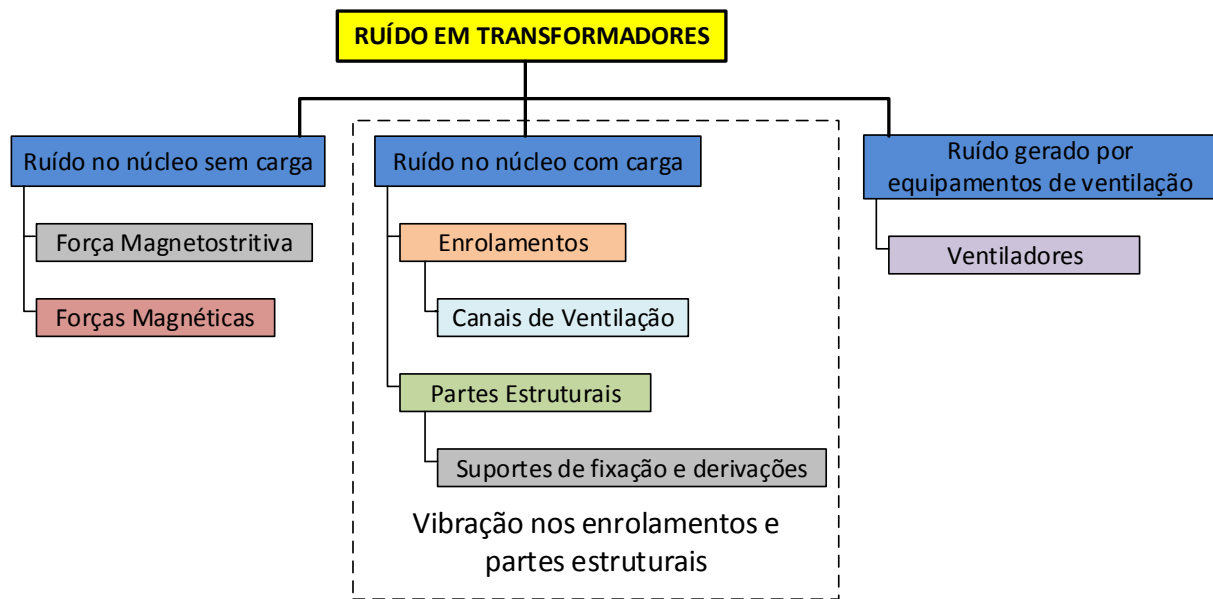
A partir da década de sessenta, o ruído gerado por transformadores deixa de ter importância secundária e começa a se tornar um tipo de poluição sonora ambiental, onde os altos níveis de ruído estão incluídos entre os sujeitos ao Controle da Poluição de Meio Ambiente, estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Os valores prejudiciais à saúde pública estão regidos pela norma NBR 10151 do ano de 2000.

O ruído emitido pelos transformadores é causado por um fenômeno chamado magnetostricção. Esse fenômeno ocorre quando um corpo metálico está sujeito a um campo magnético. Neste metal os dipolos magnéticos se orientam buscando o alinhamento com o campo magnético, resultando em expansão (geralmente de apenas alguns micrômetros) do material. Quando o campo magnético é anulado o corpo metálico retorna à sua forma anterior. Como o transformador é excitado por corrente alternada, a cada meio ciclo de onda seu núcleo se expande e se comprime, fazendo com o que o transformador tenha uma vibração com o dobro da frequência de rede elétrica (Frequência de 60Hz no caso do Brasil), gerando assim um ruído com uma frequência fundamental de 120Hz (MASIERO, 2007).

As vibrações do material ferromagnético, quando transmitidas pelo ar ou estrutura, induzem ressonâncias em outros componentes que não sejam fontes diretas de ruído, como nos enrolamentos e partes estruturais do transformador. E também como fontes de ruídos, existem os equipamentos de ventilação.

Vale salientar que existem basicamente três fontes de geração de ruído em um transformador a seco, como pode ser observado na Figura 1:

Figura 1 - Fontes de ruído em transformadores a seco



Fonte: Autoria própria

Esta emissão contínua de ruído emitida pelo transformador, dependendo do nível, pode prejudicar a qualidade de vida de quem vive e trabalha nas proximidades, tornando-se uma condição cada vez mais requisitada e complexa: a diminuição dos níveis de ruído no projeto destas máquinas.

Os primeiros estudos e trabalhos realizados no Brasil são datados na década de 1980, por causa do crescimento das cidades e maior preocupação com as leis ambientais, mas é somente a partir de 1900 que tiveram início os primeiros projetos de adequação do nível de ruído nas subestações (FERREIRA, 2006). Já que o ruído emitido por um transformador é uma fonte de incômodo e intrusão, podendo gerar queixas por parte de quem trabalha ou vive próximo, o uso de transformadores deve ser algo planejado e estudado, de modo que o mesmo possa atender à necessidade do projeto e com isso também atender suas expectativas em relação a emissão de ruídos.

Atualmente esses níveis não podem ultrapassar os valores regido pela norma (NBR 10151, 2000), como padrão de qualidade ambiental do ar. A norma estabelece que para ambientes com área mista, ou seja, predominantemente residencial, o nível máximo permitido será de 50dB(A) noturno e 55dB(A) diurno, sendo que, o período noturno não deve iniciar depois das 22h e não deve terminar

antes das 7h do dia seguinte. Se o dia seguinte for domingo ou feriado o término do período noturno não deve ser anterior às 9h.

Neste contexto, este trabalho se propõe a estudar o comportamento dos transformadores a seco isolados com resina epóxi, amplamente utilizados e difundidos.

1.1 Objetivos

Nesta seção apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de forma clara e sucinta.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo sobre o nível de ruído em transformadores a seco encapsulados pelo desenvolvimento de um algoritmo via *Matrix Laboratory* (MATLAB), de modo a obter valores de ruídos através de simulações, efetuando o comparativo entre a norma vigente, os valores encontrados pelas simulações, e os valores reais medidos. Serão sugeridas melhorias, que servirão de base comparativa para futuros projetos de transformadores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar as principais causas geradoras de ruídos nos transformadores a seco encapsulados;
- Reconhecer a importância do nível de ruído em um transformador;
- Efetuar a metodologia da medição de ruído em transformadores;
- Associar o nível de ruído conforme a variação de indução da chapa do núcleo do transformador;
- Realizar as simulações (com dados construtivos fornecidos por dois fabricantes) e comparar os dados obtidos com os valores vigentes na norma;
- Comparar os valores simulados com os valores reais para verificar a eficiência do algoritmo.

1.2 Metodologia de pesquisa

Nesta monografia esta metodologia será adaptada com o propósito de apresentar os conceitos básicos para a compreensão da causas geradoras dos ruídos em transformadores a seco encapsulados, evidenciando suas principais causas.

Inicialmente será demonstrado como são realizados nos laboratórios dos fabricantes seus respectivos ensaios, assim como evidenciar seus procedimentos de forma clara e sucinta baseada também na literatura técnica atual.

Um algoritmo será implementado e validado, baseado em seus aspectos construtivos, através de dados fornecidos por dois fabricantes de transformadores a seco e os resultados encontrados serão aferidos para verificar se estão em conformidade com as normas vigentes.

1.3 Organização da monografia

A organização desta monografia está dividida em seis capítulos, com o primeiro contendo a introdução.

O capítulo 2 descreve uma breve fundamentação teórica sobre aços elétricos e o fenômeno da magnetostrição.

O capítulo 3 apresenta informações referentes aos transformadores elétricos, tais como o princípio de funcionamento, normatizações e aspectos construtivos dos transformadores a seco.

No capítulo 4 são apresentadas algumas informações sobre a fundamentação teórica sobre o som e ruído, bem como a sua propagação sonora, pressão sonora, potência acústica emitida por um transformador, as principais fontes geradoras de ruído em transformadores a seco, e os procedimentos realizados nos ensaios para suas medições, para que o leitor tenha um melhor entendimento sobre as simulações e resultados que serão apresentados no próximo capítulo.

O capítulo 5 apresenta os resultados encontrados com o algoritmo de simulação desenvolvido e a comparação realizada entre os valores simulados e os valores medidos em laboratório.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais e sugestões para projetos e trabalhos futuros.

2 AÇOS ELÉTRICOS E MAGNETOSTRICÇÃO

2.1 Aços elétricos

Os aços elétricos são materiais magneticamente macios utilizados em inúmeras aplicações, tais como equipamentos para geração e utilização de energia elétrica. Estes aços não são responsáveis pela condução da corrente elétrica e sim do fluxo magnético em seu núcleo.

Tanto a Siderurgia como a indústria relacionada aos produtos elétricos possuem uma engenharia forte no Brasil, sendo que aproximadamente de sete milhões de toneladas anuais de aços, utilizados por suas propriedades magnéticas, um milhão são usadas em transformadores; os aços chamados de grão-orientado (LANDGRAF, 2012).

2.1.1 Tipos e propriedades dos aços elétricos

Os materiais magnéticos macios mais utilizados nos núcleos de máquinas elétricas são os chamados *aços elétricos* (MOSES, 1990). Dividem-se em três grupos de aços: com baixo teor de carbono, de grão não orientado (GNO) e de grão orientado (GO), sendo os dois últimos conhecidos como aços siliciosos. A qualidade das propriedades magnéticas e o custo aumentam pela ordem indicada (CULLITY; GRAHAM, 2009).

2.1.2 Aços de baixo carbono

Ao fim da década de 70 os primeiros transformadores construídos usavam aços de baixo carbono, com teores inferiores a 0,03% (CULLITY; GRAHAM, 2009). São aços com algumas impurezas indesejadas de carbono. Atualmente não se usa esses materiais na fabricação de equipamentos elétricos de potência, devido à alta perda do fluxo magnético, embora continuem a ser empregados na construção de pequenos motores onde essas perdas magnéticas não são um fator importante, mas

o baixo custo. Podem ser citados como exemplos, os motores de aspiradores, de máquinas de lavar roupa, e de brinquedos.

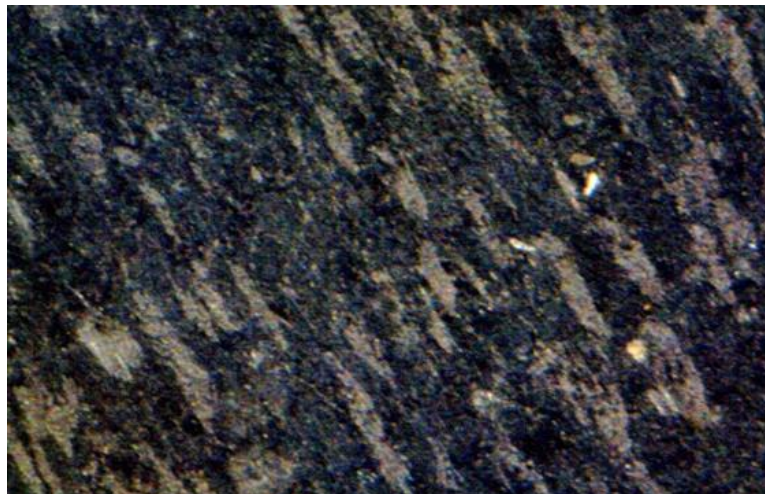
2.1.3 Aços de grão não orientado

Por volta de 1900, Robert Hadfield e equipe, estudando as propriedades eletromagnéticas das ligas de ferro-silício (Fe-Si), perceberam que a resistividade do ferro era incrementada com a adição do silício, reduzindo assim as perdas causadas por correntes parasitas.

A partir disso, houve o início do desenvolvimento tecnológico para a produção e utilização do aço silício. No início, foram desenvolvidos os aços de grão não orientados (GNO), nos quais a estrutura cristalina não possui orientação definida, facilitando a passagem do fluxo magnético em qualquer direção. Esse tipo de aço é particularmente indicado para uso em estatores de máquinas elétricas rotativas, onde o fluxo magnético não possui uma orientação definida.

Abaixo é exibida uma foto obtida por meio do microscópio digital Celestron modelo 44306 com ampliação de 200 vezes (Figura 2), obtida no Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética (LABSIEE) da UTFPR-CP.

Figura 2- Micrografia de uma chapa de FeSi com GNO



Fonte: FERREIRA (2015).

2.1.4 Aços de grão orientado

A descoberta dos aços de grão orientado (GO) foi feita por Norman P. Goss em 1933 (CULLITY; GRAHAM, 2009). A introdução da orientação de grãos foi uma inovação fundamental nos processos de fabricação de aços para núcleos, pois sua estrutura cristalina possui uma direção preferencial de magnetização, potencializando sua utilização em núcleos de transformadores.

A Acesita iniciou no Brasil a produção de aço GNO em 1956, pelo processo de laminação a quente. Já em 1979 iniciou a produção de aço GNO laminado a frio, e em 1981 a de aço GO (LANDGRAF, 2012).

O aço para núcleo é formado por cristais cúbicos sendo orientação magnética preferencial dada ao longo dos lados desses cristais. Com uma direção do fluxo ao longo da lâmina, é vantajoso orientar os cristais também ao longo das lâminas dos núcleos. Esse processo recebe o nome de orientação de grãos.

Experimentos mostram que os aços carbono sem o processo de recozimento possuem perdas por histerese e parasíticas muito altas, reduzindo bastante as perdas por histerese, eliminando discordâncias e obtendo-se tamanhos de grãos grandes, mas as parasíticas permanecem altas, pois não se alterou a espessura ou a resistividade elétrica. Assim, com a adição de silício, aumentando a resistividade elétrica, permite uma redução nas perdas parasíticas, apesar de pouco efeito nas perdas por histerese. Assim o processo de recozimento, juntamente com a adição de silício, promove baixas perdas por histerese e parasíticas nos aços carbono (TOLEDO, 2007).

Muitos experimentos têm sido realizados ao longo desses últimos anos sempre proporcionando chapas de aços elétricos mais eficientes e com valores próximos a 6,5% em peso de silício. Sabe-se que, com aproximadamente 6,5% em peso de silício, a permeabilidade magnética alcança seu valor máximo, as perdas parasíticas caem a seu mínimo e a magnetostrição tende a zero (MOSES, 1990).

No entanto, quando a proporção de silício no núcleo estiver acima de 3,5% em peso, o material torna-se extremamente frágil, causando dificuldades no processo de laminação convencional e também no próprio manuseio e transporte do transformador, onde qualquer vibração ou impacto pode causar uma fissura no material.

Abaixo temos uma foto obtida por meio do microscópio digital Celestron modelo 44306 com ampliação de 200 vezes (Figura 3), tirada no Laboratório de Segurança Iluminação e Eficiência Energética (LABSIEE) da UTFPR-CP.

Figura 3 - Micrografia de uma chapa de FeSi com GO



Fonte: FERREIRA (2015).

2.2 Magnetostricção

As fontes de ruído em transformadores elétricos estão bem definidas, sendo a principal a magnetostricção, que consiste na alteração das dimensões dos materiais ferromagnéticos quando imersos em campos magnéticos. Por ser um fenômeno de difícil controle e de real importância na geração de ruídos indesejáveis, tem-se cada vez mais estudos relacionados (JORGE, 2015).

A magnetostricção foi descoberta por Joule há mais de 150 anos, o efeito magnetostritivo mais conhecido é o ruído dos transformadores em operação.

A origem microscópica da magnetostricção é o acoplamento spin-órbita, ou seja, entre os spins eletrônicos e o movimento orbital dos elétrons em torno dos núcleos atômicos. Por conta desta diferença de energia os spins eletrônicos se alinham ao campo, modificando os orbitais atômicos e conseqüentemente, modificando a distância entre os átomos do material sujeito ao campo. Macroscopicamente a variação destas distâncias produzem o deslocamento e rotação de domínios magnéticos que, por sua vez, gera a deformação macroscópica nos materiais, fenômeno que chamamos magnetostricção. Dependendo do tipo de

material, tais deformações podem implicar em uma expansão ou redução na dimensão na direção do campo magnético externo aplicado (SEVERINO, 2005).

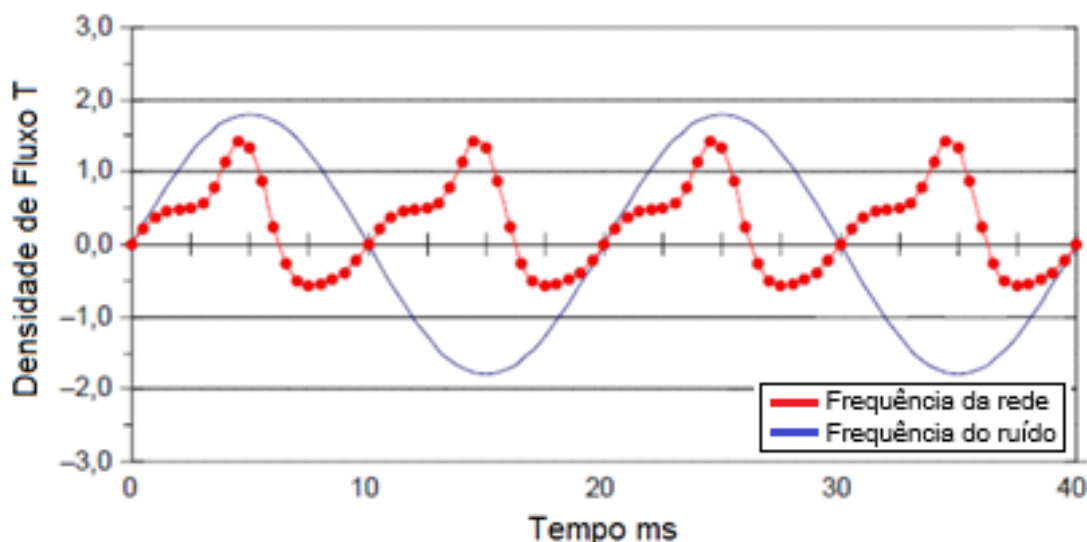
A magnetostricção é a razão entre a variação do comprimento pelo comprimento da barra como mostra a Equação 1.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

A deformação relativa, λ , devida à magnetostricção linear é dada por l : o comprimento da amostra no estado desmagnetizado; e Δl : a variação da dimensão na direção do campo magnético. Podemos dizer que a magnetostricção é positiva se a amostra se alonga no sentido do campo magnético, e negativa se ela se contrair, este valor é aproximadamente na ordem de 10^{-6} a 10^{-5} (CULLITY; GRAHAM, 2009).

O maior inconveniente da magnetostricção é seu ruído durante o funcionamento de transformadores em regime alternado, devido a vibração das chapas do núcleo (tração e contração) a uma frequência dupla da de funcionamento, exemplificado na Figura 4.

Figura 4 - Frequência da rede x frequência do ruído

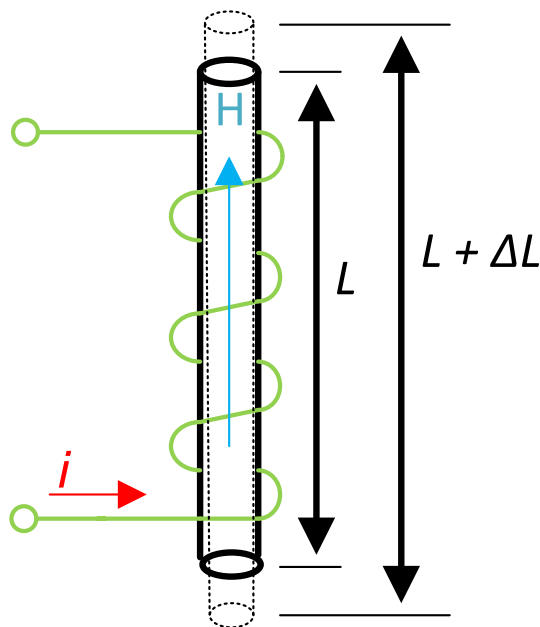


Fonte: Adaptado de Ocón (2011).

Como mencionado, o efeito magnetostritivo altera as dimensões dos materiais quando expostos a um campo magnético, mas não altera o volume do

material. Este fenômeno é ilustrado na Figura 5, tendo como exemplo um tubo de material ferromagnético de comprimento L inserido dentro de uma bobina cujo fio transporta corrente elétrica, de modo a induzir um campo magnético no espaço onde o tubo está inserido. Nestas condições, o comprimento do tubo aumenta em ΔL e a razão $\Delta L/L$ é o valor da magnetostricção. Esta figura ilustra que o aumento em comprimento na direção do campo gera uma diminuição no comprimento em direções perpendiculares a este, observando que a magnetostricção pode ter valores positivos ou negativos, dependendo em que sentido se executa a medição (JORGE, 2015).

Figura 5 - Campo magnético em um material ferromagnético



Fonte: Autoria própria

3 TRANSFORMADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

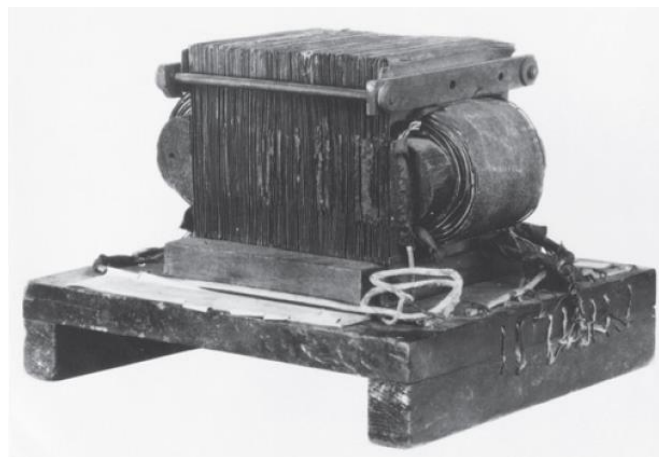
3.1 Introdução

Historicamente o primeiro sistema de distribuição de energia elétrica implantada foi nos Estados Unidos, um sistema de corrente contínua de 120 Volts, inventado por Thomas A. Edison. A primeira estação geradora de energia elétrica de Edison começou a operar na cidade de Nova York em setembro de 1882. O problema inicial é que este sistema gerava e transmitia energia elétrica com tensões tão baixas que eram necessárias correntes muito altas para fornecer quantidades significativas de energia, gerando assim grandes perdas nas linhas de transmissão, restringindo severamente a área de atendimento de uma estação geradora.

O transformador teve o seu desenvolvimento simultâneo ao de estações geradoras de energia de corrente alternada, eliminando assim as restrições de alcance e de capacidade dos sistemas de energia elétrica, gerando menos perdas no sistema de transmissão.

A Figura 6 mostra o primeiro transformador moderno prático, elaborado por William Stanley em 1885, sendo o núcleo constituído de chapas individuais.

Figura 6 - Primeiro transformador moderno prático



Fonte: General Eletric Company.

Historicamente, apesar das primeiras versões fabricadas “a seco”, os transformadores se difundiram depois da utilização do dueto papel x óleo como sistema isolante.

Atualmente os transformadores a óleo são os mais utilizados em diversas áreas. Mas regulamentos mais rigorosos surgiram, com muitas restrições ao local de instalação dos transformadores a óleo, gerando uma busca por transformadores ecologicamente mais corretos, pois as principais razões estavam no risco de fogo, no caso de uma falha; e na poluição ambiental, devido aos vazamentos de óleo e ruídos.

A partir dos anos 90 os transformadores do tipo seco vêm substituindo os transformadores com óleo isolante, principalmente em áreas industriais e comerciais.

3.2 Conceitos básicos e normatizações

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o transformador é um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas, sem mudança de sua frequência (NBR 5356-3, 2014).

O *American National Standards Institute* (ANSI) e o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) consideram a função de controle do transformador de potência, definindo-o como um equipamento estático, desprovido de partes sujeitas a movimento contínuo, utilizado em sistemas elétricos para transferir potência entre circuitos por meio de indução eletromagnética (ANSI/IEEE C57.12.00, 2010).

A normalização facilita a troca de informações entre clientes e fornecedores, reduz as variedades de equipamentos, e permite a padronização de procedimentos, inclusive produtivos, aumentando a economia na produção e na utilização de equipamentos e serviços. Outro benefício é a definição de requisitos técnicos mínimos que permitem aferir a qualidade do equipamento e oferecem maior confiança na proteção da vida humana e do meio ambiente.

Algumas das principais normas técnicas, nacionais e internacionais, relacionadas aos transformadores, em relação aos ruídos, tipo a seco e aos transformadores em geral, são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de Normas

NORMA/ANO	DESCRIÇÃO
NBR 5356-1/2007	Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades
NBR 5356-2/2007	Transformadores de potência - Parte 2: Aquecimento
NBR 5356-3/2007	Transformadores de potência - Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar
NBR 5356-4/2007	Transformadores de potência - Parte 4: Guia para ensaio de impulso atmosférico e de manobra para transformadores e reatores
NBR 5356-5/2007	Transformadores de potência - Parte 5: Capacidade de resistir a curtos-circuitos
NBR 10295/2011	Transformadores de potência secos – Especificação
NBR 7277/1988	Transformadores e reatores - Determinação do nível de ruído
NBR 5440/2014	Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos
ANSI/IEEE C57.12.00/2010	<i>IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers</i>
IEC 60076/2008	<i>Power transformers</i>
IEC 60076-11/2005	<i>Power transformers - Part 11: Dry-type transformers</i>

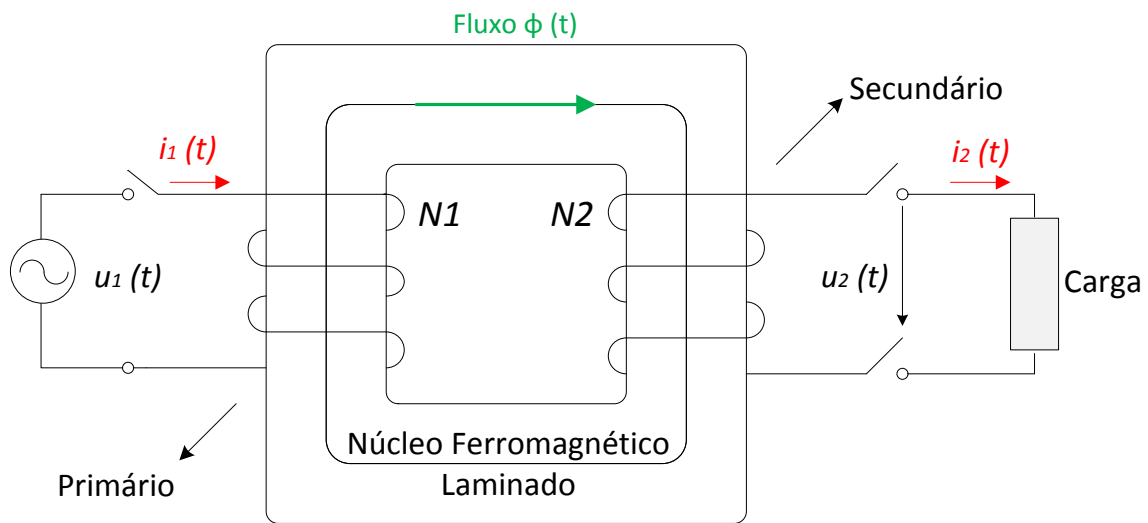
Fonte: Autoria própria

3.3 Princípio de funcionamento

O funcionamento do transformador exige apenas a existência de fluxo mútuo alternado concatenado com dois enrolamentos, utilizando-se do conceito de indutância mútua. Tal ação será obtida também se for utilizado um núcleo de ar, mas será mais eficiente com um núcleo de ferro, ou em outro material ferromagnético, porque a maior parte do fluxo estará confinada a um caminho definido, concatenado com ambos os enrolamentos (FITZGERALD, 2006).

Um dos enrolamentos do transformador é conectado a uma fonte de energia elétrica de corrente alternada e o segundo (e possivelmente um terceiro) enrolamento do transformador fornece energia à carga. Denominamos este primeiro enrolamento primário ou de entrada e o enrolamento conectado à carga como enrolamento secundário ou de saída, como mostrado na Figura 7. Se houver um terceiro enrolamento, ele será denominado enrolamento terciário (CHAPMAN, 2012).

Figura 7 - Representação esquemática de um transformador



Fonte: Autoria própria

A relação entre as tensões do primário e do secundário é dada pela Equação 2,

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2)$$

onde:

a : relação de transformação;

N_1 : número de espiras do primário;

N_2 : número de espiras do secundário;

$u_1(t)$, $u_2(t)$: tensões no primário e no secundário, respectivamente;

$i_1(t)$, $i_2(t)$: correntes no primário e no secundário, respectivamente;

$\Phi(t)$: fluxo magnético.

A Figura 7 demonstra um transformador monofásico, em regime estacionário e ideal (ou seja, desprezam-se as resistências nos circuitos e as perdas dos fluxos magnéticos). Quando é aplicada uma tensão alternada no primário, cria-se corrente elétrica, que percorre esta bobina e induz uma força magnetomotriz (diferença de potencial magnético) alternada no interior da bobina. Esta força, por sua vez, cria um fluxo magnético, também alternado, no núcleo, de acordo com a Lei de Ampere. A

parte deste fluxo magnético, que é comum aos circuitos primário e secundário, induz uma força eletromotriz nos enrolamentos dos circuitos, segundo a Lei de Faraday.

É importante observar que, para existir a variação do fluxo magnético, o transformador deve ser alimentado com tensão alternada. A taxa de variação do fluxo é a mesma para os dois enrolamentos e a sua frequência permanece inalterada.

3.4 Transformador ideal

Para considerarmos um *transformador ideal*, as relações entre a tensão de entrada e a tensão de saída e entre a corrente de entrada e a corrente de saída são dadas por duas equações simples (FITZGERALD, 2006).

Como exemplo, tem-se o transformador mostrado na Figura 8 com N_p espiras no lado do enrolamento primário e N_s espiras no lado secundário. A relação entre a tensão $V_p(t)$ aplicada no lado do enrolamento primário do transformador e a tensão $V_s(t)$ produzida no lado do secundário é dada pela Equação 3.

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3)$$

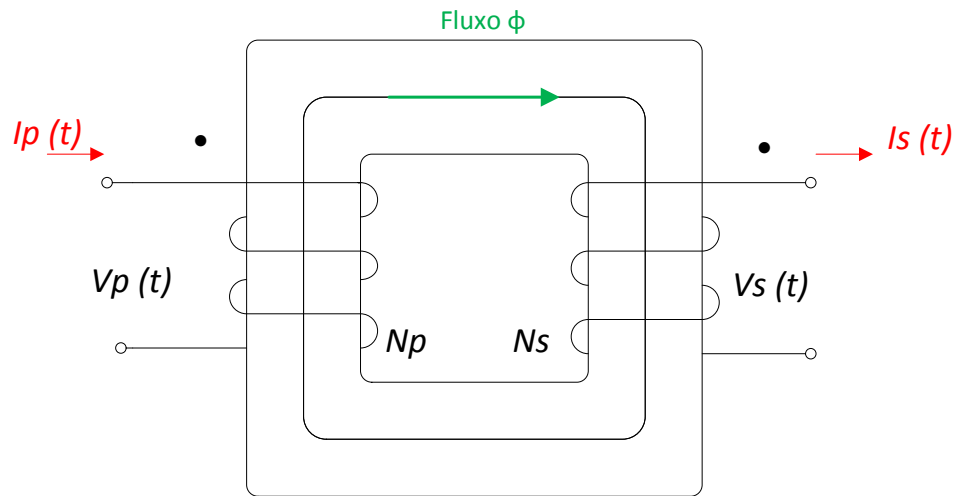
Em que a é definido como a relação de espiras ou de transformação do transformador, definida pela Equação 4.

$$a = \frac{N_p}{N_s} \quad (4)$$

A relação entre a corrente $I_p(t)$ que “entra” no lado primário do transformador e a corrente $I_s(t)$ que “sai” do lado secundário do transformador é dada pela Equação 5.

$$N_p \cdot I_p(t) = N_s \cdot I_s(t) \quad (5)$$

Figura 8 - Representação de um transformador ideal



Fonte: Autoria própria

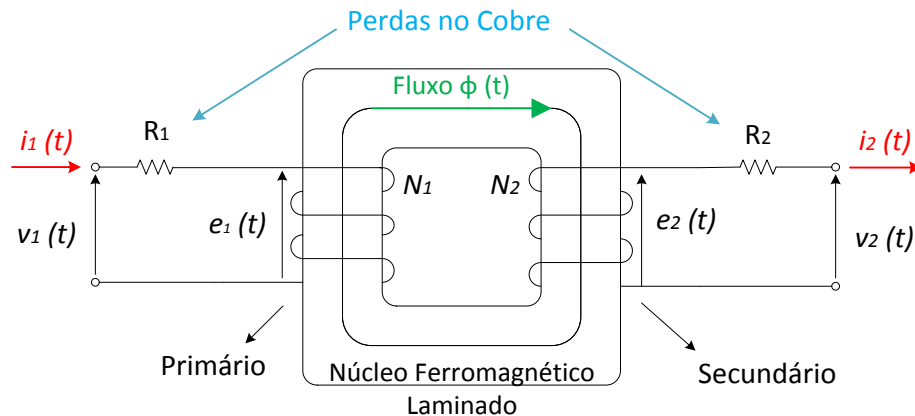
Neste exemplo temos ilustrado um transformador ideal de dois enrolamentos. Por transformador ideal entende-se aquele cujas perdas decorrentes de sua operação em regime permanente, à frequência industrial constante, podem ser desprezadas, ou seja: resistências dos enrolamentos desprezíveis; fluxo magnético completamente confinado no núcleo, concatenando-se com ambos os enrolamentos; perdas no núcleo desprezíveis, e permeância do núcleo infinita. Obviamente, estas condições são apenas considerações práticas, e nunca são atingíveis no transformador real.

3.5 Modelo equivalente do transformador real

O circuito equivalente de um transformador real é constituído por resistências e indutâncias, e estas são responsáveis por perdas em relação ao transformador ideal.

A inserção da resistência R_1 e R_2 representam as perdas Joule, conhecida também por perdas no cobre nos enrolamentos, como mostrado na Figura 9, que são as resistências próprias dos enrolamentos primário e secundário.

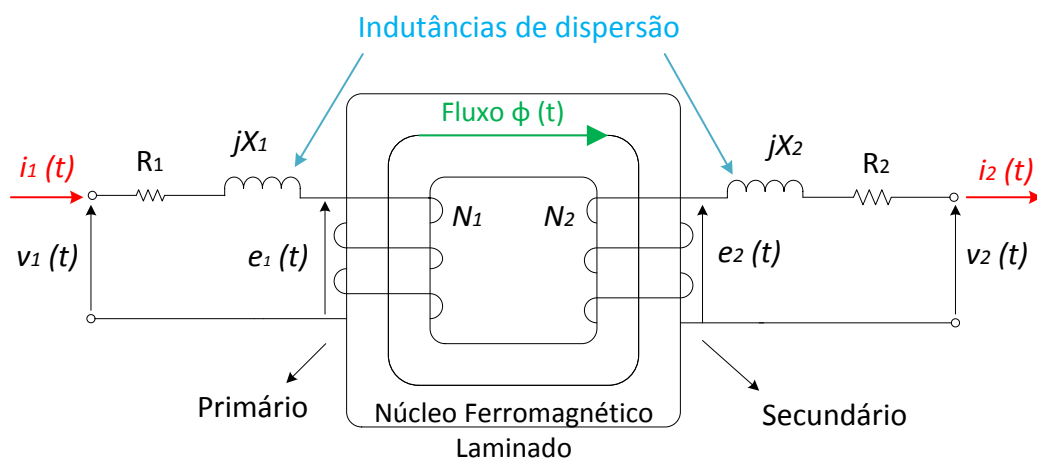
Figura 9 - Representação das perdas Joule do transformador



Fonte: Autoria própria

Os efeitos do fluxo de dispersão no primário e no secundário do transformador são simulados por reatâncias indutivas, denominadas indutâncias de dispersão, tais que as quedas de tensão nessa indutância são numericamente iguais as parcelas de fem's induzida pelos respectivos fluxos de dispersão (SAMBAGUI, 2008). A Figura 10 mostra a representação da dispersão nos enrolamentos primário e secundário.

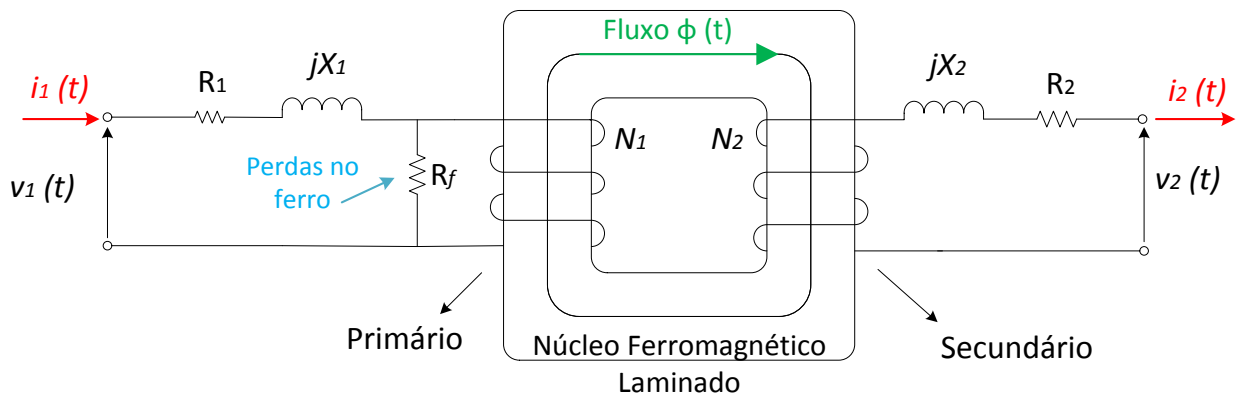
Figura 10 - Representação da dispersão no transformador



Fonte: Autoria própria

As perdas no ferro podem ser representadas por uma resistência, designada por resistência de perdas no ferro, em paralelo com a fem (*força eletromotriz*) induzida pelo fluxo mútuo, conforme mostrado na Figura 11.

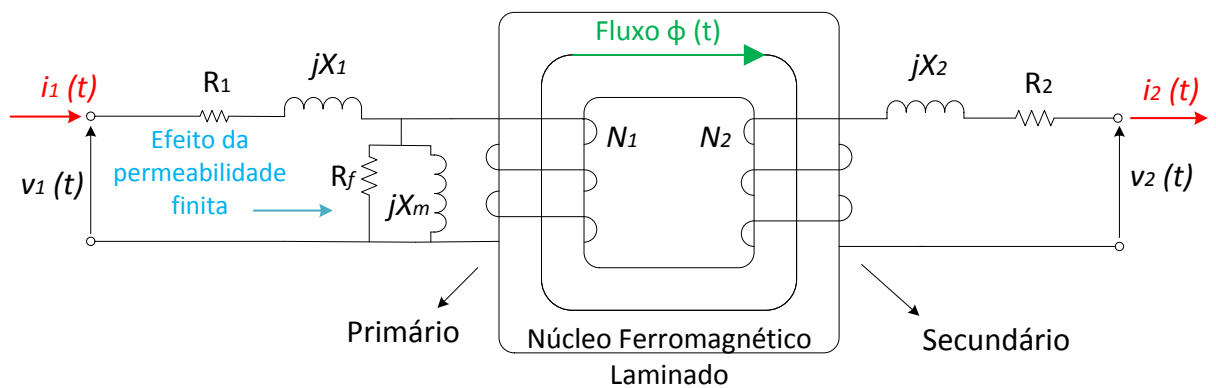
Figura 11 - Representação das perdas no ferro do transformador



Fonte: Autoria própria

O efeito da permeabilidade finita do fluxo ferromagnético é representado inserindo uma reatância indutiva em paralelo com a *fem* induzida (SAMBAQUI, 2008). Essa reatância é apresentada na Figura 12, denominada reatância de magnetização do transformador.

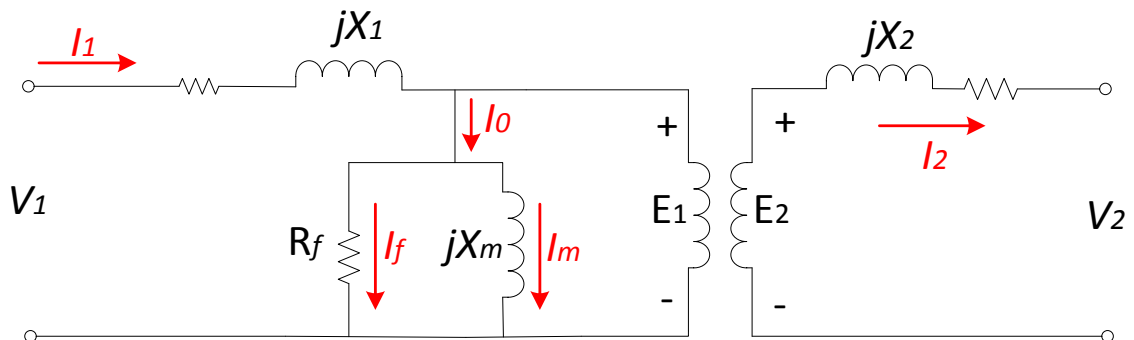
Figura 12 - Representação da permeabilidade do fluxo do transformador



Fonte: Autoria própria

Assim, o circuito equivalente do transformador real é mostrado na Figura 13,

Figura 13 - Representação da permeabilidade do fluxo do transformador



Fonte: Autoria própria

onde:

V_1, V_2 : tensão no enrolamento primário e secundário, [V];

E_1, E_2 : tensão no enrolamento primário e secundário, [V];

R_1, R_2 : resistência das bobinas, [Ω];

R_f : perdas no ferro, [Ω];

X_1, X_2 : indutância de dispersão, [Ω];

X_m : reatância de magnetização, [Ω];

I_1, I_2 : corrente do primário e secundário [A];

I_0 : corrente de excitação [A];

I_m : corrente de magnetização [A];

I_f : corrente no ferro [A].

3.6 Transformadores a seco

Conforme a Norma NBR 10295 de 2011 os transformadores a seco são aqueles cuja parte ativa não é imersa em óleo isolante. E conforme a Norma NBR 14039 de 2005, a sua utilização é exigida em subestações de transformação que fazem parte integrante de edificações industriais, residenciais ou comerciais, mesmo que haja paredes de alvenaria e portas corta-fogo. O projeto e construção dos transformadores a seco devem atender às normas da ABNT, e com isto também atender às normas internacionais IEC 60076, relacionadas aos transformadores.

Os primeiros transformadores do tipo a seco surgiram por volta de 1880, já os

transformadores a seco moldados em resina começaram a ser produzidos a partir de 1960 (CAMARGO, 2005).

Desde 1990 os transformadores do tipo a seco em resina epóxi vêm substituindo os transformadores a óleo, em muitas instalações industriais e comerciais. Atualmente esse tipo de transformador reune todas as vantagens para a distribuição de energia elétrica, de forma mais econômica, segura, confiável e ecológica, embora ainda o tipo mais utilizado é o do tipo a óleo. No cenário atual, tanto grandes indústrias, como empresas de distribuição de energia, *shopping centers*, hospitais, aeroportos, e metrô; precisam de um número considerável de transformadores. Com o objetivo de responder a esta demanda, tais empresas têm a sua disposição dois tipos de transformadores, sendo eles os isolados a óleo e, mais recentemente, os transformadores isolados a seco (CAVALHEIRO; PAVAN, 2013).

Tanto o transformador a seco como a óleo apresentam diferenças que devem transcender a questão econômica, já que a necessidade de manutenção, locais para a instalação, e a sustentabilidade ambiental, são questões que devem ser consideradas pela empresa para a escolha destes equipamentos. Porém, o que acontece na maior parte dos casos, é o fato de que algumas empresas apenas comparam os custos do produto para a tomada de decisão, sendo o mais recomendado levar em consideração os possíveis impactos que uma escolha inadequada poderia causar no ponto de vista ambiental e social. Mas um fato que merece atenção é qual o tipo de transformador utilizado, pois essa escolha pode gerar um impacto ambiental muito grande.

Atualmente, os transformadores escolhidos são na maioria do tipo a óleo, geralmente por falta de conhecimento de tecnologias compatíveis do próprio comprador, como foi constatado na pesquisa realizada pela Unicamp em 2013 (CAVALHEIRO; PAVAN, 2013).

Existem muitas diferenças entre o transformador a óleo e a seco, na Tabela 2 são apresentadas estas principais diferenças a serem relevadas na escolha entre os dois tipos de transformadores.

Tabela 2 – Transformadores a óleo x transformadores a seco

ITEM	LÍQUIDO ISOLANTE	GEAFOL
Manutenção	Deve ser periódica (análise físico-química e tratamento do líquido, correção de vazamentos).	Isento
Vida útil	25/30 anos	Igual ou superior
Obras Civas	Demanda de itens de segurança (paredes e portas corta-fogo, sistema contra incêndio, poço para recolhimento de fluido em caso de vazamento).	Não demanda obras especiais
Segurança	Risco de explosão e incêndio, vazamentos e contaminação do ambiente.	Não explode, não alimenta ou propaga incêndios. Apenas sensores de temperatura
Proteção	Vários acessórios para proteção e controle.	para alarme, desligamento e medição de temperatura.
Restrições Ambientais	Risco de contaminação pelo vazamento do líquido isolante.	Sem restrições
Ambiente	São afetados pela umidade, salinidade, oxidante, etc.	Insensível à umidade e outros fatores ambientais.
Certificação ISO 14000 NR-10	Recomenda cuidados com esse tipo de equipamento. Tendência a se evitar esta execução.	Recomendado por não apresentar riscos ao ser humano e ao meio ambiente.

Fonte: PAVAN.

Os transformadores a seco encapsulados possuem maior robustez mecânica, excelente resistência ao envelhecimento térmico, menor nível de descargas parciais internas, menor ruído, e a possibilidade de instalação mais próxima ao ponto de carga, diminuindo as perdas com os cabos de alimentação. Porém, este tipo de transformador possui um custo mais elevado que os transformadores a óleo.

Mas nos dias de hoje, cada vez mais empresas buscam a ISO-14001, a qual é uma norma internacionalmente reconhecida que define um Sistema de Gestão Ambiental (SGA) efetivo e atende à norma regulamentadora NR-10, que estabelece os requisitos e condições mínimas para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com

eletricidade. Assim cada vez mais empresas têm optado pelos transformadores a seco, fazendo com que a escolha do equipamento transcenda apenas a questão de preço.

Transformadores a seco são cada vez mais utilizados em áreas urbanas por serem mais seguros e possuir um nível de ruído menor em comparação aos transformadores a óleo. Testes comparativos mostram que nos transformadores a seco até 1000 kVA, o nível de ruído é de 10 a 12 dB menor do que os transformadores a óleo de mesma potência (PETROVIC; LUKIC; KOLAREVIC; LUKIC, 2012).

Pode-se citar como principais vantagens dos transformadores a seco encapsulados:

- Possuem aproximadamente 45% da área de um transformador a óleo;
- Transformadores a seco ocupam menos espaço físico, simplificam as obras civis, diferente dos transformadores a óleo que necessitam a execução de poços de recolhimento de líquido, sistemas de combate a incêndio, paredes corta-fogo, ...;
- Simplificam a parte da instalação elétrica justamente por dispensar a maioria dos acessórios de supervisão do transformador;
- Apresentam um custo operacional mais baixo, pois não necessitam de manutenção constante e não apresentam os instrumentos de proteção e controle, típicos de transformadores a óleo;
- Devido à inexistência de fluido isolante, não há risco de explosão e incêndio, e não propagam ou intensificam o fogo, devido ao material isolante do transformador a seco ser auto extingüível;
- Quando envolvidos em incêndios, não produzem nenhum gás ou cinza tóxicos, não poluindo o ar nem o solo, podendo ser considerados mais ecológicos;
- São insensíveis à umidade, permitindo a sua energização a qualquer momento, mesmo desligados por longos períodos de tempo;
- Suportam fortes sobrecargas e excelente resistência ao curto-circuito, devido à configuração e construção de suas bobinas;
- Quando equipados com ventilação forçada adequada, proporcionam uma sobrecarga de no mínimo 40%;

- Podem atingir uma elevação de temperatura superior aos transformadores isolados a óleo;
- Não agredem a natureza;
- Sua construção robusta faz com que suporte uma inclinação de quinze graus em relação ao plano horizontal durante seu funcionamento;
- São fabricados com materiais adequados para o uso também em altas temperaturas;
- Redução na matéria-prima utilizada já que possui dimensões finais menores que os a óleo;
- Baixo nível de ruído.

3.7 Características construtivas do transformador a seco

Os transformadores a seco são basicamente constituídos por duas partes, a parte ativa e os acessórios complementares.

3.7.1 Parte ativa

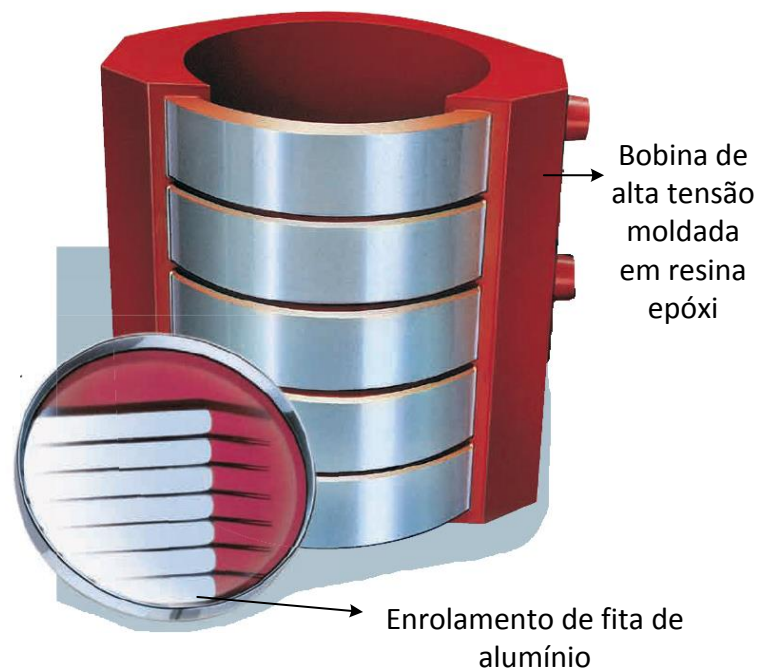
A parte ativa é constituída pelos enrolamentos e pelo núcleo, no caso dos transformadores a seco do tipo isolado a resina epóxi e os enrolamentos de baixa tensão devem ser em fita ou fio de alumínio. As espiras devem ser coladas entre si por isolante, através de processo térmico, a fim de garantir um conjunto compacto, sempre com materiais Classe F (155°C) ou superior. Os enrolamentos de alta tensão devem ser em fita ou fio de alumínio. A bobina total deve ser encapsulada com resina epóxi sob vácuo ou pelo processo reforçado com fibras de vidro, impedindo a inclusão de bolhas de ar, segundo IEC 60076-11.

Esse procedimento de encapsulamento em resina epóxi sob alto vácuo, contribui para o anulamento da presença de microbolhas de ar no isolamento, porque elas são responsáveis pela criação do efeito capacitivo na isolação que produz descargas elétricas parciais e comprometendo o funcionamento e a vida-útil do transformador.

Atualmente as bobinas do transformador a seco são produzidas com fita de alumínio. A fita consiste em uma técnica bastante simples e de alta segurança

elétrica, pois a isolamento é menos solicitada que em outras formas de enrolamento, ou seja, podem suportar altos valores de tensão aplicada. Outro motivo da escolha do alumínio é porque o coeficiente de dilatação do alumínio e da resina epóxi estão tão próximos que as tensões mecânicas que ocorrem, com o aquecimento, são mínimas; evitando o risco de fissuras (SIEMENS S.A., 2007).

Figura 14 - Enrolamento de um transformador a seco



Fonte: Adaptado SIEMENS S.A. (2007).

A Resina Epóxi é utilizada em diversas áreas, por possuir excelentes características de isolamento e encapsulamento, propriedades termoelétricas e termomecânicas, resistência a intempéries e a formação de trincas e fissuras, fazendo com que sejam cada vez mais utilizadas na indústria elétrica. Pode-se citar alguns tipos de aplicações: isoladores internos e externos de transformadores de distribuição, buchas isoladoras, disjuntores, transformadores de corrente e potencial, isolamento de barramentos elétricos, impregnação de estatores e rotores bobinados de máquinas elétricas rotativas, enrolamento de transformadores, ... (CAMARGO, 2005).

Por sua vez, o núcleo do transformador a seco é constituído de lâminas de material ferromagnético composto por silício, que possui excelentes características de magnetização (temporária), baixas perdas por histerese e por mudança de

temperatura. O empilhamento das lâminas isoladas entre si e do núcleo busca diminuir a ação das correntes parasitas que podem surgir devido à variação de fluxo ocorrido sobre o material (SERAFIM, 2009).

A NBR 9119 exige que o núcleo deve ser constituído de chapas de aço silício de grão orientado, com envelhecimento máximo de 5%, laminadas a frio, tratadas e isoladas entre si com material inorgânico, com alta permeabilidade magnética e baixas perdas.

As colunas e culatras devem ser prensadas por meio de perfis de aço e cintas de material isolante. Após esta operação, o núcleo montado deve ser pintado com tinta dielétrica (60kV/mm) de classe F (155°C), com a finalidade de proteção dielétrica e contra corrosão, além de reduzir os níveis de ruído.

Também com a finalidade de diminuir as perdas nestas chapas são feitos cortes a 45° nas junções entre as culatras e os pilares conforme a Figura 15. Os tipos de chapas de aço silício mais utilizadas são: M4 da Acesita; M0H e equivalentes; 023ZDKH-90, e equivalentes (WEG S.A., 2010).

Figura 15 - Núcleo de um transformador



Fonte: WEG S.A. (2010).

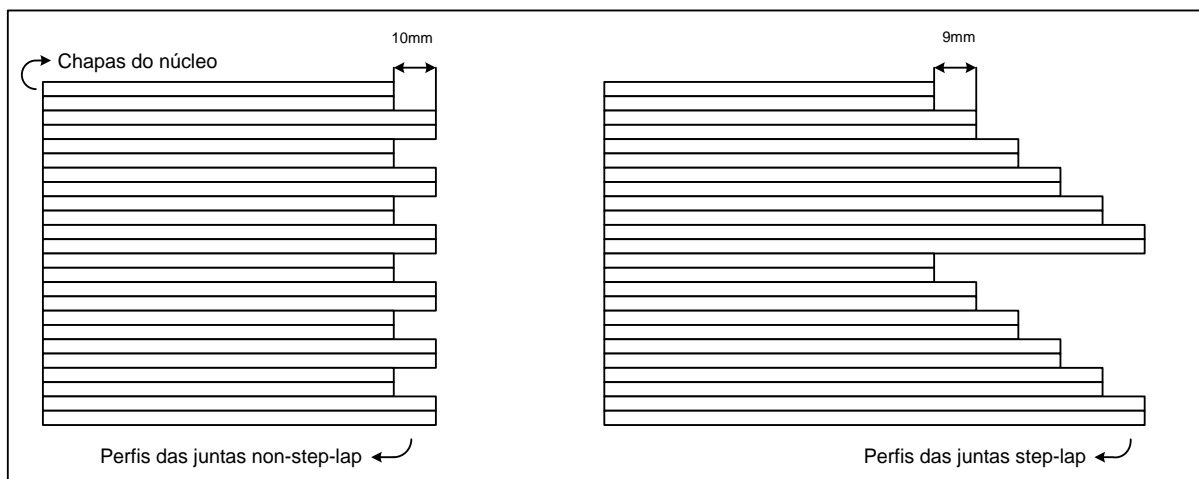
Cada núcleo possui um tipo de junta definida pelo projetista eletromecânico do transformador. São conhecidos na literatura dois tipos diferentes de juntas:

- junta *step-lap*;
- junta padrão ou *non-step-lap*.

A junta do tipo *step-lap* foi desenvolvida durante as décadas de sessenta e setenta pela Westinghouse. Este tipo de junta no transformador possui aproximadamente um decréscimo de 10% nas perdas magnéticas e de cinco a sete decibéis no nível de ruído para indução típica de operação.

O número de lâminas por camada influencia na dimensão do entreferro e no nível de ruído, e é estabelecido a partir de análise econômica global de produção do núcleo. Quando são chapeadas 2 (duas) ou 3 (três) lâminas por camada os resultados são bastante satisfatórios (VALKOVIC, 1982).

Figura 16 - Perfis das juntas do núcleo do transformador



Fonte: Autoria própria

Por fim os enrolamentos são prensados contra o núcleo com calços elásticos, os quais propiciam desacoplamento das vibrações do núcleo, fazendo com que o transformador apresente nível de ruído semelhante ou até menores daqueles em líquido isolante (SIEMENS S.A., 2007).

3.7.2 Acessórios Complementares

Os acessórios complementares são o tanque, os radiadores (se existir), as buchas, ventiladores, base com rodas bidirecionais, comutador, e a placa de identificação.

No caso do transformador a seco, o tanque de refrigeração e os radiadores não existem, pois sua refrigeração, quando necessária, é feita por ventiladores radiais que podem ser instalados adicionalmente e controlados por sensores de temperatura.

As buchas, quando aplicáveis, devem ter nível de isolamento de valor igual ou superior ao nível de isolamento dos enrolamentos a que estão ligadas, e devem satisfazer a ABNT NBR 5034. Seu objetivo é simplesmente transmitir energia elétrica de dentro para fora (e vice-versa) de equipamentos como transformadores, disjuntores, reatores *shunt*, e condensadores elétricos. A bucha é construída de forma que um condutor esteja confinado em seu interior, fornecendo um caminho condutivo de uma extremidade à outra (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

Os transformadores secos são geralmente providos de painel de comutação, o qual é fundido na parte frontal de cada fase do enrolamento de alta tensão. Este sistema propicia uma fácil mudança de tensões com o equipamento desenergizado.

Alguns dos principais acessórios complementares descritos acima podem ser melhor exemplificados conforme a Figura 17.

Figura 17 - Acessórios complementares



Fonte: Adaptado COMTRAFO (2017).

4 SOM E RUÍDO

O som faz parte do ambiente em que vivemos, mas da mesma forma que sons podem ser úteis, um som pode tornar-se desagradável e indesejável, dependendo das suas características: amplitudes, frequência, duração e adaptação do indivíduo ao meio ambiente. A um som desagradável, denomina-se ruído (VIEIRA, 2009).

O ruído pode causar perturbações na comunicação, aparelho digestivo, aumento da irritabilidade e estresse, dificulta a memorização e a concentração, além de limitar as noites de sono (FIGURA, 2013).

Na realidade, qualquer meio elástico pode propagar o som, mas a propagação no ar é a mais importante no escopo deste trabalho.

Os transformadores transmitem um som de baixa frequência, considerado como um ruído, que pode incomodar as pessoas próximas de suas imediações, também conhecido como um zumbido (RON, 2010).

A norma NBR 10295-11/2011, Transformadores de potência secos – Especificação, determina que os níveis de ruídos produzidos pelos transformadores a seco não podem ultrapassar os limites estabelecidos pela Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis de ruídos para transformadores a seco

Nível médio do ruído dB		Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos a kVA
AN	ANAN	
58	57	0 - 300
60	59	301 - 500
62	61	501 - 700
64	63	1001 - 1500
65	64	1501 - 2000
66	65	2001 - 3000

Fonte: NBR 10295-11 (2011).

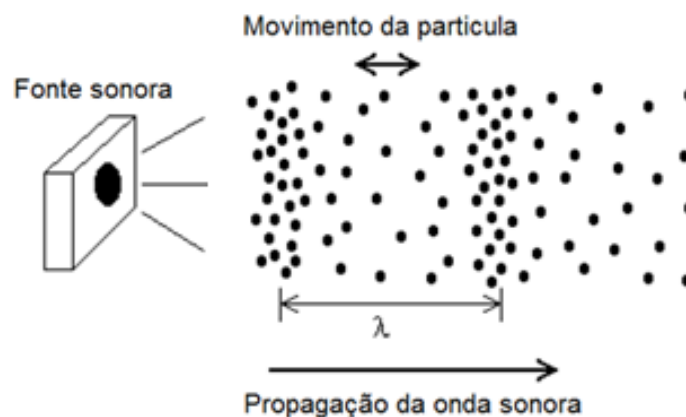
4.1 Propagação do som

A transmissão e propagação do som a partir do transformador pode ser feita por vários meios, tais como ar, metal, concreto, madeira ou qualquer combinação. Dependendo da área na qual é propagado o som, ocorre a amplificação do mesmo, devido à presença de superfícies refletoras (RON, 2010).

Para entender melhor sobre a propagação do som no meio, é necessário analisar esse meio ao nível de partículas. Se for excitada por uma vibração mecânica, uma partícula se desloca da sua posição de equilíbrio por uma pequena distância. Este deslocamento empurra a partícula vizinha na mesma direção, enquanto a anterior retorna à posição de equilíbrio. A vizinha causa um deslocamento em sua próxima vizinha, e assim sucessivamente.

Analisando uma partícula separadamente, esta irá apresentar um movimento oscilatório de pequeno deslocamento, propagado pelas diversas partículas do meio no que se caracteriza como uma onda, podendo ser transmitida através desta, como mostrada na Figura 18 (DINIZ, 2003).

Figura 18 - A propagação de uma onda ao nível de partícula



Fonte: Adaptado de (Diniz, 2003).

4.2 Pressão sonora

O nível de pressão sonora é medido em Decibéis (dB), em homenagem a Graham Bell, o inventor do telefone, e significa que “Esta relação logarítmica é definida como Bel, mas é empregada a unidade que representa um décimo dela, que é mais conveniente, chamada decibel e designada como dB.” (MENDES, 2007).

O som se propaga de forma ondulatória, e sua velocidade de propagação depende das características da onda e do meio do qual se propaga, no caso o ar, a velocidade dependerá da pressão atmosférica e da densidade do ar (FIGURA, 2013).

Associa-se o som com o deslocamento das partículas de um meio elástico, em relação à suas posições de equilíbrio. Dessa forma, as compressões e expansões do meio causam flutuações de pressão. Como essas flutuações ocorrem devido à transmissão de um som, recebem a denominação de pressão sonora (GERGES, 2000).

Conforme as definições da IEC 60076-1/2005, a pressão acústica é considerada como uma pressão flutuante superposta à pressão estática pela presença do som. Para efetuar o cálculo do nível da pressão acústica tem se a Equação 5,

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (5)$$

onde:

L_p : nível de pressão acústica, em dB;

p : pressão flutuante superposta à pressão estática, em Pa;

p_0 : pressão acústica de referência ($p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa).

4.3 Potência acústica emitida pelo transformador

Para se deduzir os níveis de potência acústica em transformadores, deve se utilizar a norma NBR-7277, onde o cálculo do nível de ruído (L_W) do equipamento sob medição deve ser ponderada, conforme a Equação 6.

$$L_W = L_p + 10 \cdot \log \frac{S}{S_0} \quad (6)$$

onde:

L_W : nível de potência acústica, em dB;

L_p : nível médio de pressão acústica, em dB;

S_0 : área de referência = 1 m²;

S : área de superfície de medição em metros quadrado.

Diferente dos transformadores a óleo que possuem tanques de resfriamento, a área S da superfície de medição para transformadores a seco, em metros quadrados, é calculada pela Equação 7 (NBR-7277, 2013).

$$S = (h + 1) \cdot p_m \quad (7)$$

onde:

h : altura do núcleo do transformador, incluindo-se a estrutura, em metros;

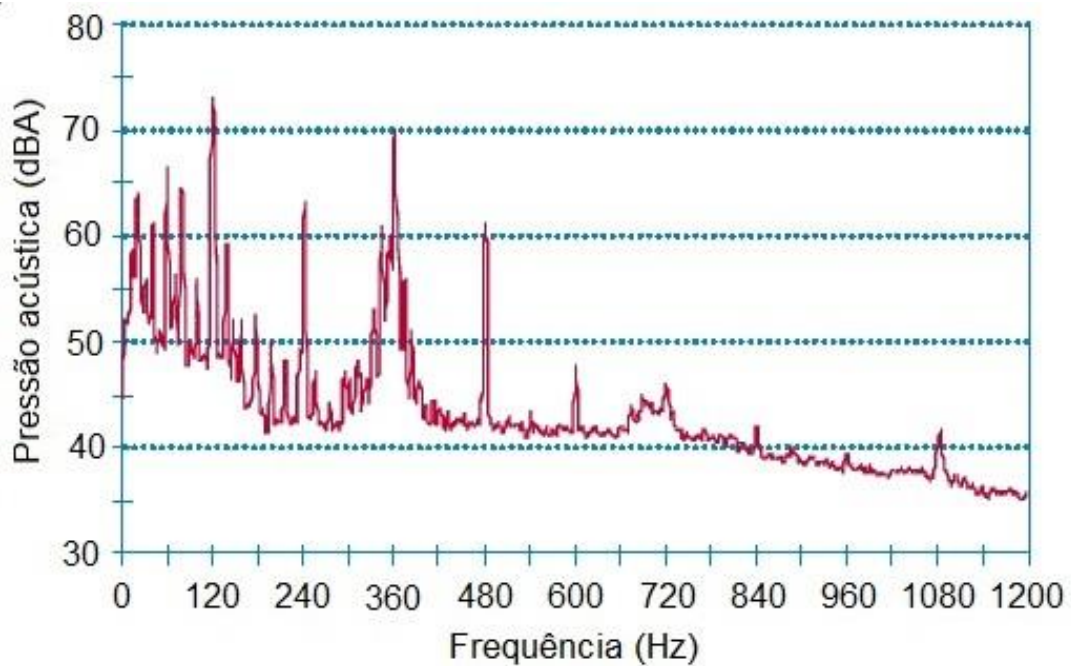
p_m : comprimento da linha prescrita de contorno, em metros.

4.4 Fontes geradoras de ruído em transformadores a seco

Em IEEE C57.94 - Práticas Recomendadas para Instalação, Aplicação, operação e manutenção dos transformadores a seco; diz que o som audível produzido pelos transformadores é devido à magnetização do núcleo pela tensão alternada aplicada aos enrolamentos. Tal fato cria uma vibração física não só no núcleo, devido a magnetostrição, mas também se espalha por toda a estrutura ligada a ele: bobinas, sistemas auxiliares, ar, ou qualquer combinação; produzindo um som audível. Outra fonte geradora de ruído são os ventiladores utilizados para seu resfriamento.

Na maioria dos casos, o ruído do sistema de ventilação é mascarado pelo ruído gerado pela vibração eletromecânica do transformador a seco, que se origina no núcleo ferromagnético. Essa vibração ocorre pelo fato do núcleo ser formado por um conjunto de chapas justapostas, que ao serem excitadas por forças de magnetostrição e por forças de atração e repulsão magnéticas, acabam sendo responsáveis pelos sons emitidos. Assim a vibração do núcleo é transmitida aos sistemas auxiliares a ela fixados (caixas de comando, fixadores e suportes variados). A seguir a Figura 19 apresenta um espectro de ruído em um transformador.

Figura 19 - Espectro de ruído do transformador



Fonte: Adaptado de Ocón (2011).

Existem basicamente três fontes de produção de ruído em transformadores a seco:

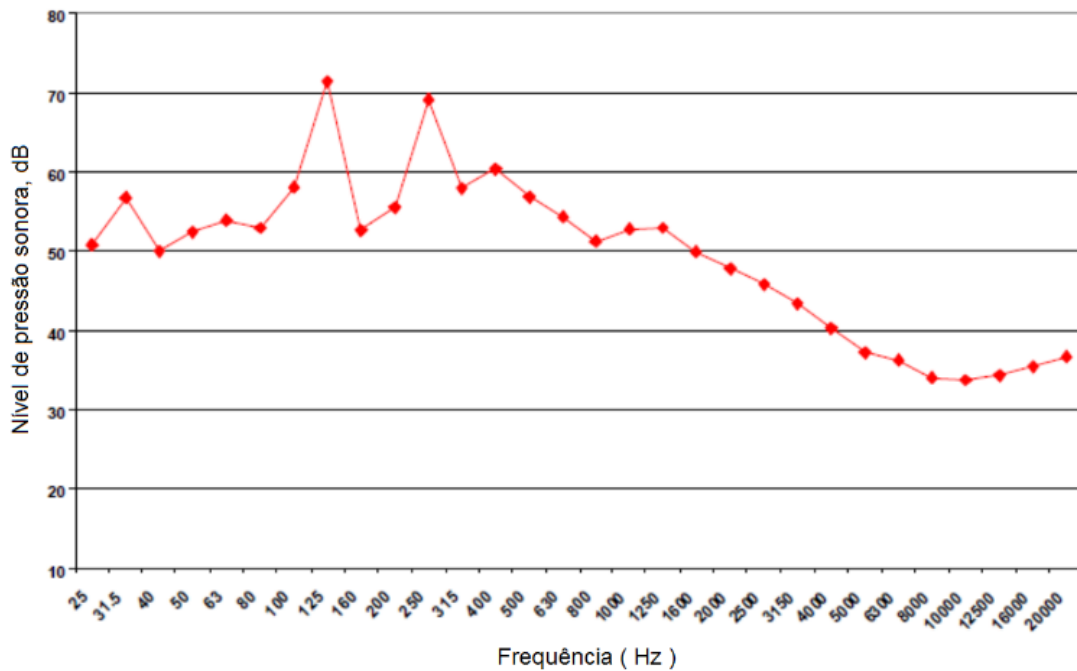
- Ruído no núcleo do transformador;
- Ruído causado por forças eletromagnéticas;
- Ruído de ventiladores.

4.4.1 Ruído do Núcleo do Transformador

Como visto anteriormente quando as lâminas do núcleo são magnetizadas, estas sofrem pequenas alterações em suas dimensões devido a magnetostricção e quando o campo magnético é anulado o material retorna à sua forma original. Como o transformador é excitado por corrente alternada, a cada meio ciclo de onda seu núcleo se expande e se comprime, fazendo com que o transformador vibre com o dobro da frequência de rede com que é alimentado, no caso do Brasil o ruído do transformador terá frequência fundamental de 120Hz (MASIERO, 2007).

Para melhor entendimento, na Figura 20 tem-se o espectro de ruído medido no núcleo do transformador, e pode ser observado que o pico do ruído ocorre na frequência de 120Hz.

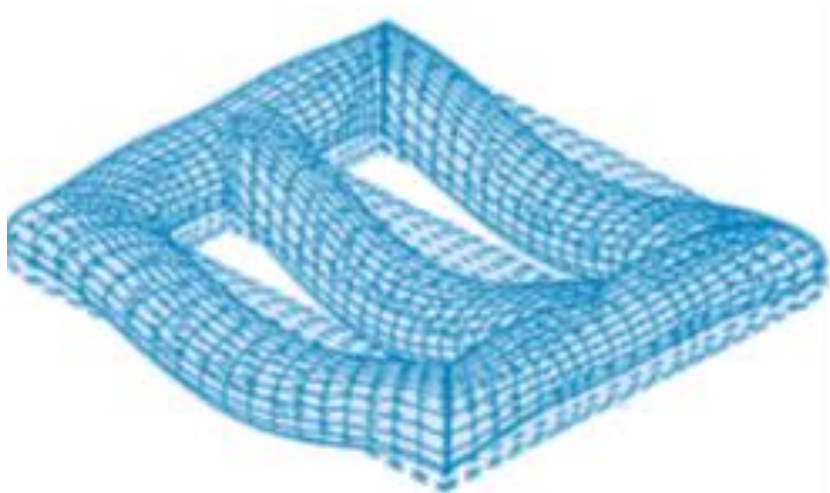
Figura 20 - Nível de ruído medido no núcleo do transformador



Fonte: Adaptado de Ocón (2011).

Na Figura 21 é possível observar o comportamento do núcleo do transformador em ressonância.

Figura 21 - Ressonância no núcleo do transformador



Fonte: Adaptado de Ocón (2011).

4.4.2 Ruído Causado por Forças Eletromagnéticas

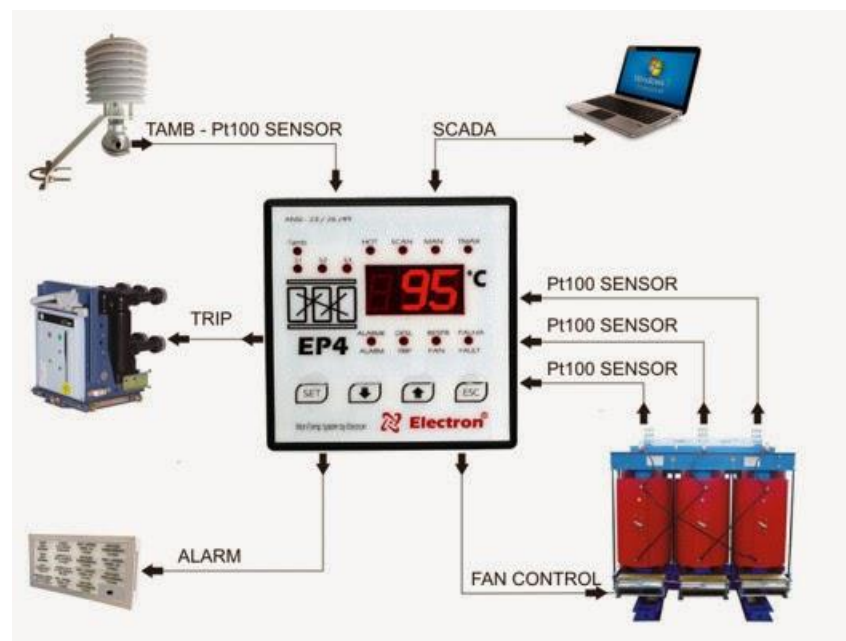
No caso de transformadores secos, o ruído gerado por forças eletromagnéticas, atuam sobre os enrolamentos de forma que estas forças oscilatórias fazem com que as bobinas vibrem tanto no sentido axial como radialmente. A vibração ocasionará não só distúrbios de deslocamentos de ar, mas também vibração física de toda a estrutura do núcleo e elementos conectados a ele, por exemplo: a carcaça, bobinas, e seus sistemas auxiliares.

4.4.3 Sistema de refrigeração e seus ruídos

Diferente dos transformadores à óleo, que também podem possuir bombas no sistema de refrigeração, os transformadores a seco realizam, quando necessária, a sua refrigeração por sistemas de ventiladores.

A Figura 22 é um exemplo de um sistema de proteção térmica bastante utilizado em transformadores a seco.

Figura 22 - Equipamentos auxiliares de refrigeração



Fonte: TOP ELÉTRICA (2014).

Pode-se observar na figura acima um relé de proteção térmica para transformador, com quatro entradas de temperatura, uma para cada bobina e uma

da temperatura ambiente, três saídas, uma para atuação do alarme, outra para atuação da saída de comando de desligamento (TRIP) e outra para controlar os ventiladores (ligamento, desligamento e velocidade). O mesmo pode ser ou não ligado a um sistema de rede local, na qual o operador pode controlar e configurar os parâmetros desejados por um computador, ou então configurar no próprio relé os parâmetros desejados, como temperatura na qual vai ligar os ventiladores, suas velocidades e temperatura limite para acionamento do alarme e sistema de proteção de desligamento. Geralmente o relé de controle fica ao lado do transformador em seu painel de controle conforme a Figura 23.

Figura 23 - Painel de controle de temperatura

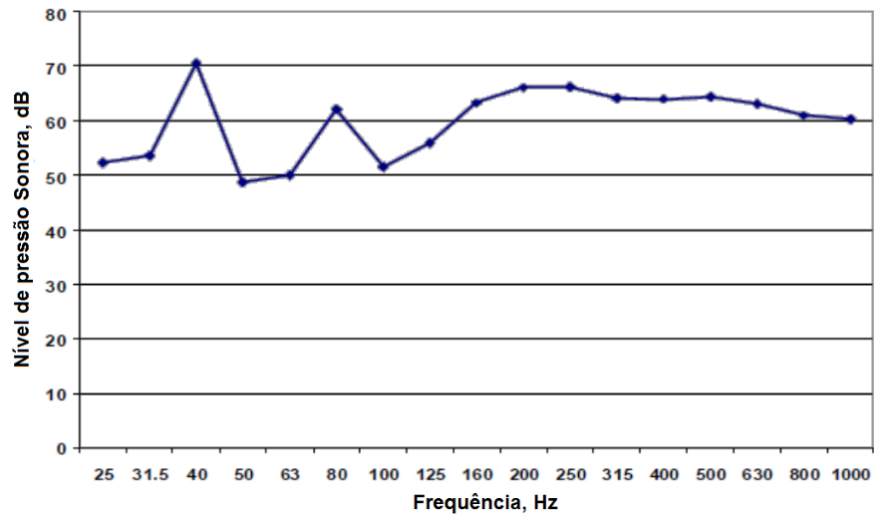


Fonte: ADAPTADO COMTRAFO (2017).

O ruído gerado pelo sistema de ventilação, normalmente é encoberto pelo ruído gerado pela vibração eletromecânica do transformador a seco. Pode-se dizer que os ventiladores utilizados no sistema de refrigeração dos transformadores só colaboram para o ruído total em transformadores pequenos e de baixa indução.

Alguns dos fatores que afetam a saída do ruído total nos ventiladores são: velocidade de rotação, desenho das pás, número de pás, entre outros. A Figura 24 apresenta o nível de ruído provocado pelos ventiladores e equipamentos de refrigeração do transformador.

Figura 24 - Nível de ruído dos equipamentos auxiliares de refrigeração



Fonte: Adaptado de Ocón (2011).

4.5 Procedimentos de medições de ruídos

A Norma NBR7277/2013 prescreve os métodos de determinação dos níveis de ruídos audível de transformadores. Esta norma aplica-se nas medições realizadas nas instalações do fabricante ou outros locais adequados. Os níveis de ruído do equipamento e do ambiente devem ser determinados como níveis de pressão acústica em dB.

As medições devem ser feitas com um medidor que esteja de acordo com a IEC 651, e as instruções de operação fornecidas pelo fabricante do medidor devem ser seguidas a fim de obter o máximo grau de precisão. Devem ser atendidas as instruções relativas à distância mínima entre o observador e o microfone, o que é necessário para evitar erros devido a reflexões.

O local de ensaio deve proporcionar linhas prescritas de contorno situadas dentro de um campo sonoro, essencialmente não perturbado por reflexões provenientes de objetos nas imediações e dos contornos da sala.

Para medição do nível de ruído, o equipamento a ensaiar deve estar provido de seus equipamentos auxiliares normais, visto que estes podem influenciar o resultado da medição. Em seguida o transformador deve ser excitado em vazio com tensão nominal, de forma senoidal e frequência nominal, estando o comutador, se existir ligado na derivação principal.

No caso dos transformadores a seco a superfície principal de irradiação é obtida pela projeção vertical da linha de contorno correspondente a uma corda esticada envolvendo o transformador a seco, conforme especificado na Figura 25.

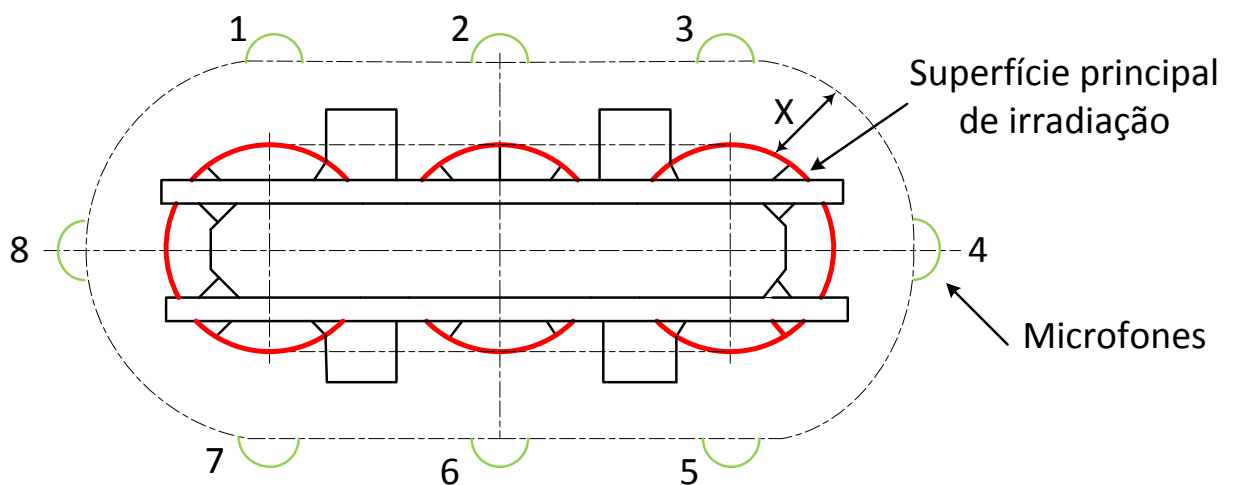
A linha prescrita de contorno, deve estar afastada 0,3m da superfície principal de irradiação e é nela onde vão ser posicionados os microfones para captação dos ruídos, dispostas em intervalos iguais e não superiores a 1m como mostra a Figura 25. Em caso de segurança a distância entre a superfície principal de irradiação e a linha de contorno pode variar até no máximo 1m.

Não é aconselhável realizar medições de ruído em grandes transformadores nos primeiros minutos subsequentes a sua energização, pois se for efetuada 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. O valor máximo varia em média de 4 a 20 vezes a corrente nominal e costuma-se admitir seu tempo de duração em torno de 0,1s (WEG S.A, 2010).

Antes e depois de cada sequência de medições deve ser realizada uma verificação acústica dos equipamentos de medição, através de um calibrador.

A Figura 25 apresenta os pontos típicos de medição realizados no ensaio, em vista superior do transformador a seco. Neste estudo as medições foram realizadas a 1 metro da superfície principal de irradiação, ou seja, $X = 1\text{m}$.

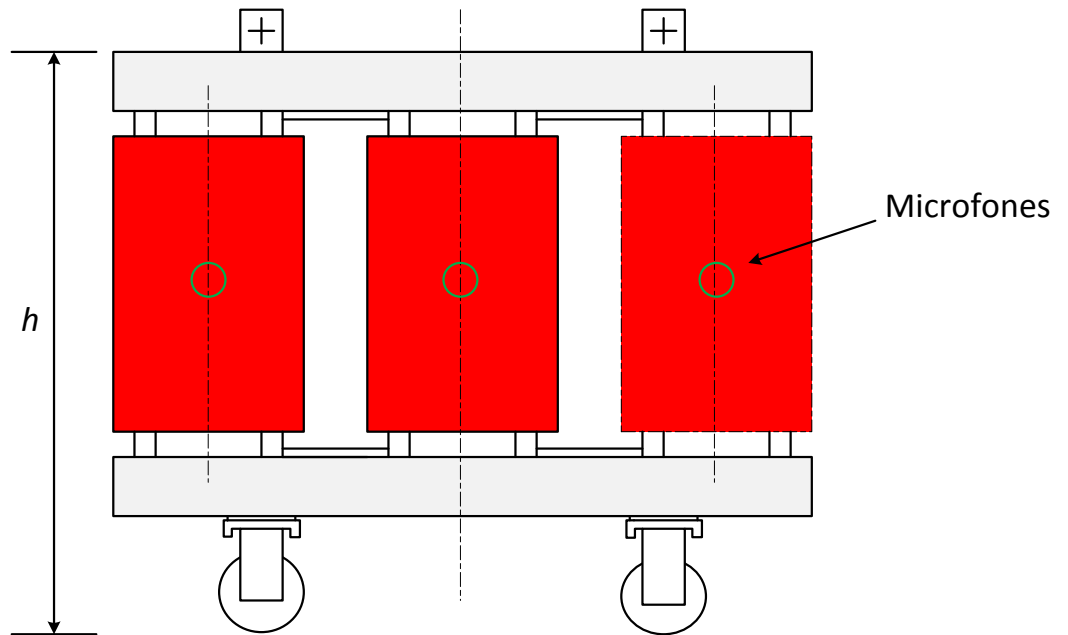
Figura 25 - Posições típicas dos microfones para a medição de ruído em transformadores a seco



Fonte: Adaptado NBR 7277.

A Figura 26 apresenta os pontos típicos de medição realizados no ensaio, em vista frontal do transformador a seco, sendo h a altura do núcleo incluindo partes estruturais.

Figura 26 - Vista frontal das posições típicas dos microfones para a medição de ruído em transformadores a seco



Fonte: Adaptado NBR 7277.

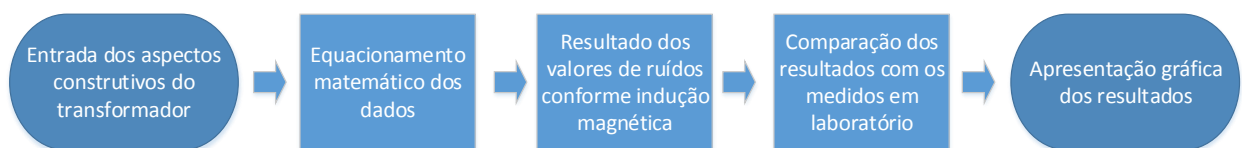
5 SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES

5.1 Simulações

As simulações foram realizadas em 6 classes de transformadores trifásicos a seco em resina epóxi, com potências de 45kVA; 75kVA; 112,5kVA; 150kVA; 225kVA; e 300kVA; e com classe de tensão de 15kV.

Todas as simulações foram realizadas com a implementação de um algoritmo via MATLAB, conforme o diagrama de blocos da Figura 27, utilizando 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, identificados aqui como Fabricante A e B.

Figura 27 - Diagrama de bloco do funcionamento do algoritmo

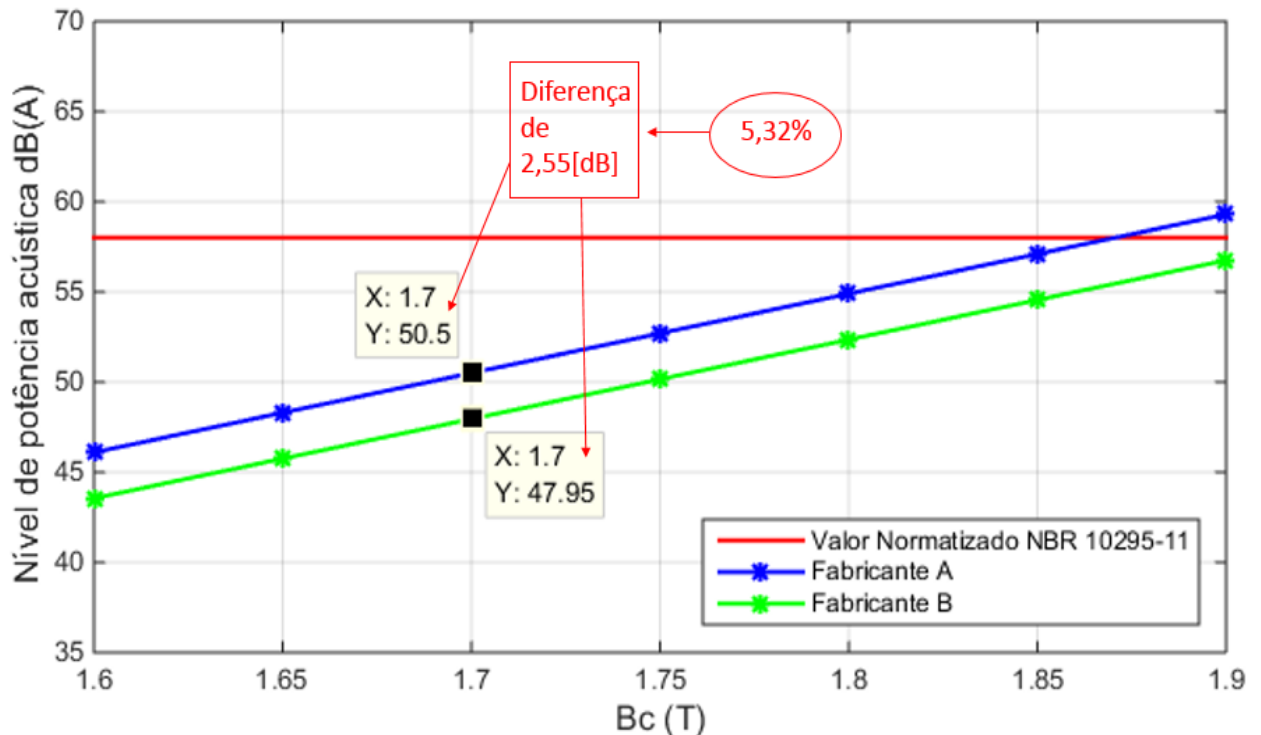


Fonte: Autoria própria

Nas simulações, variou-se os valores da indução magnética das chapas em um intervalo de 1,6 a 1,9T para verificar o comportamento do ruído do transformador a seco, e se os mesmos estarão dentro dos valores normatizados pela NBR 10295-11.

A Figura 28 apresenta a simulação realizada com o transformador de 45kVA, dos fabricantes A e B, utilizando seus aspectos construtivos e variando a indução magnética das chapas do núcleo do transformador. Estes dois fabricantes, utilizam chapa de aço silício de grão orientado com uma indução magnética de 1,7T, para todos os transformadores utilizados no estudo.

Figura 28 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 45kVA

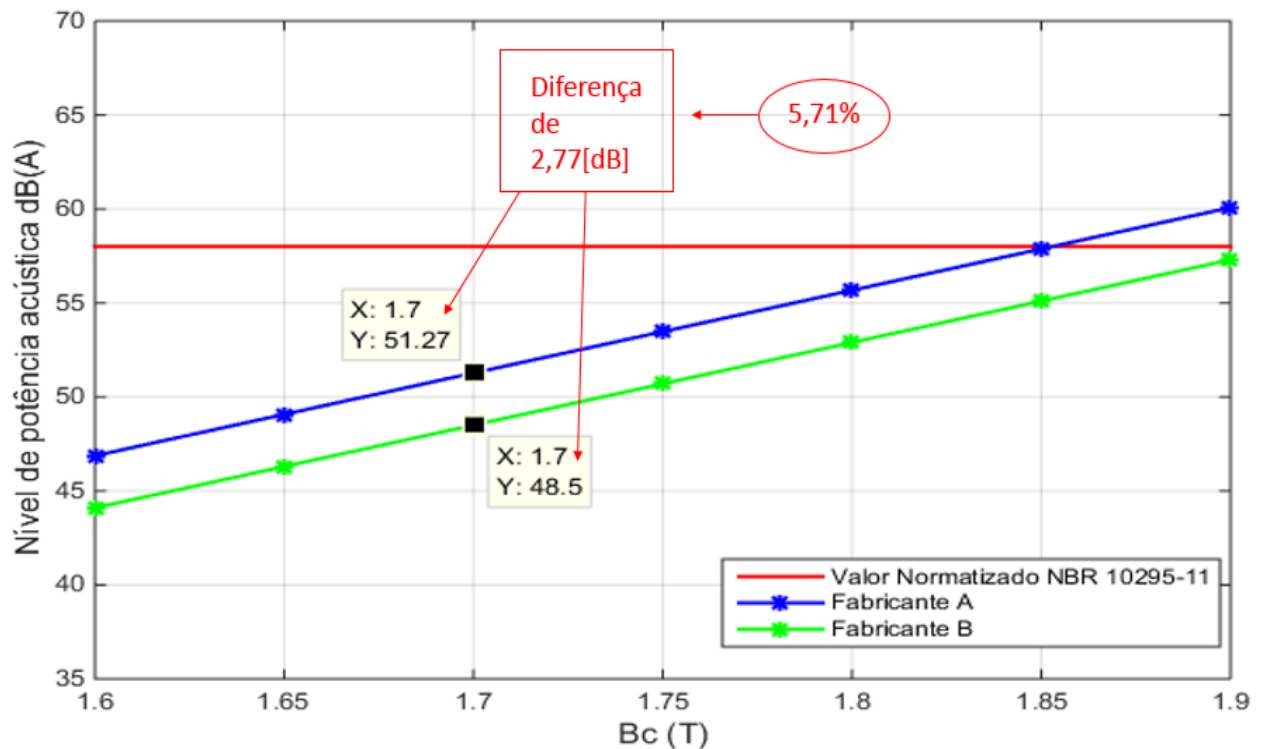


Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Figura 28 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 50,50[dB] e o fabricante B 47,95[dB]. Com isso percebe-se uma diferença de 2,55[dB] ou seja 5,32% entre o fabricante A e o fabricante B, sendo o primeiro com um nível de ruído menor para o transformador de 45kVA. Tanto o fabricante A como o fabricante B apresentam um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 10295-11. Alguns estudos indicam que a percepção auditiva das variações de intensidade sonora é aproximadamente igual a 1[dB], o que significa que é necessário um aumento de 1[dB] no nível do som para que possamos perceber um pequeno aumento na intensidade sonora, nesse caso com uma diferença de 2,55[dB], pouco perceptível ao sistema auditivo humano.

A Figura 29 apresenta a simulação realizada com o transformador de 75kVA, dos fabricantes A e B.

Figura 29 -Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 75kVA

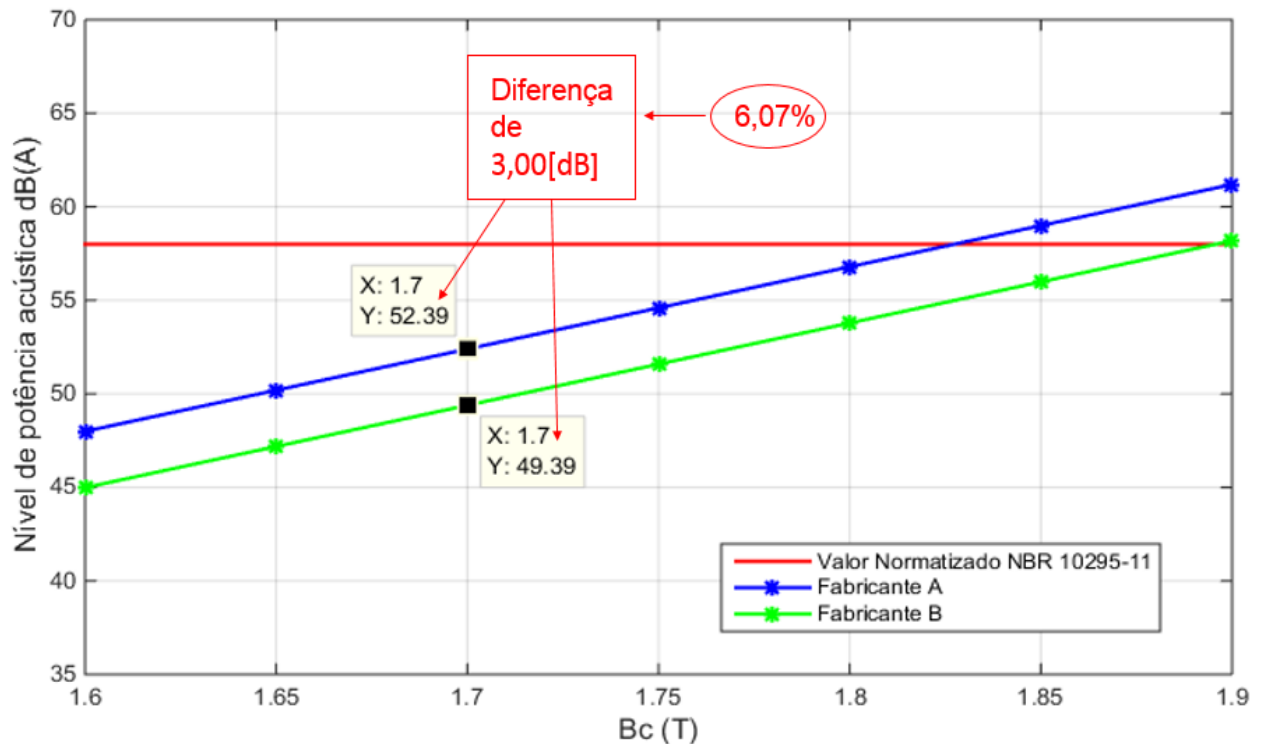


Fonte: Autoria própria

Como observado na Figura 29, o fabricante A apresentou um nível de ruído de 51,27[dB] e o fabricante B 48,50[dB]. Com isso percebe-se uma diferença de 2,77[dB] ou seja 5,71% entre fabricante A e o fabricante B, sendo o primeiro com um nível de ruído menor, para o transformador de 75kVA. Tanto o fabricante A como o fabricante B apresentam um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 10295-11. Como mencionado anteriormente, nesse caso com uma diferença de 2,77[dB], será pouco perceptível ao sistema auditivo humano.

A Figura 30 apresenta a simulação realizada com o transformador de 112,5kVA; dos fabricantes A e B.

Figura 30 -Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 112,5kVA

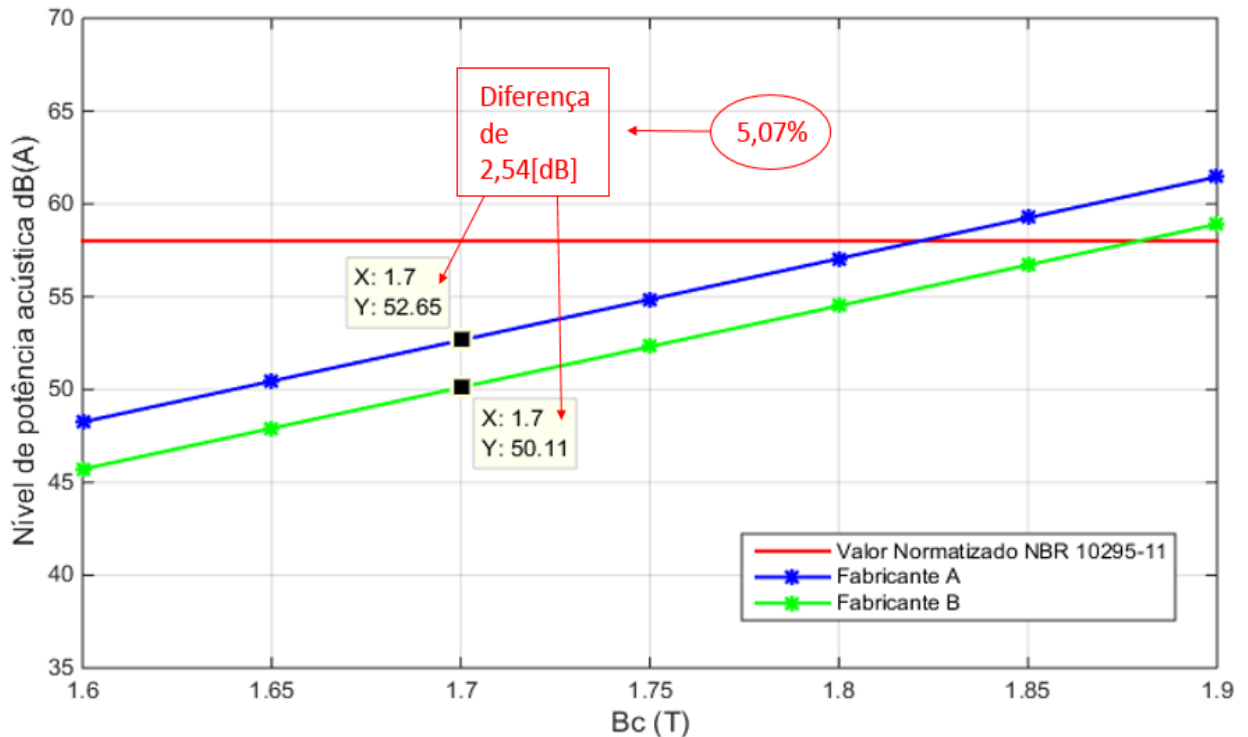


Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado, o fabricante A apresentou um nível de ruído de 52,39[dB] e o fabricante B 49,39[dB]. Com isso percebe-se uma diferença de 3,00[dB] ou seja 6,07% entre fabricante A e o fabricante B, sendo o primeiro com um nível de ruído menor, para o transformador de 112,5kVA. Tanto o fabricante A como o fabricante B apresentam um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 10295-11. Como mencionado anteriormente, nesse caso com uma diferença de 3,00[dB], será pouco perceptível ao sistema auditivo humano.

A Figura 31 apresenta uma simulação realizada com o transformador de 150kVA, dos fabricantes A e B.

Figura 31 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 150kVA

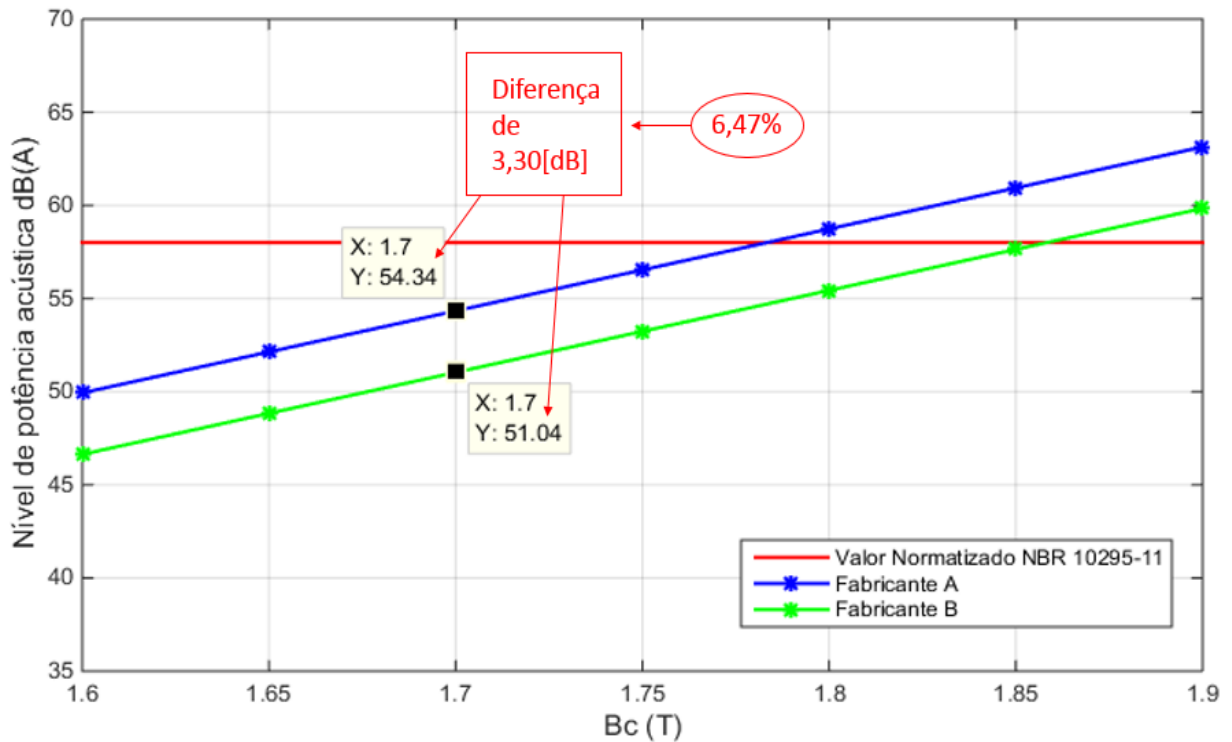


Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado, o fabricante A apresentou um nível de ruído de 52,65[dB] e o fabricante B 50,11[dB]. Com isso percebe-se uma diferença de 2,54[dB] ou seja 5,07% entre fabricante A e o fabricante B, sendo o primeiro com um nível de ruído menor, para o transformador de 150kVA. Tanto o fabricante A como o fabricante B apresentam um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 10295-11. Como mencionado anteriormente, nesse caso com uma diferença de 2,54[dB], será pouco perceptível ao sistema auditivo humano.

A Figura 32 apresenta uma simulação realizada com o transformador de 225kVA, dos fabricantes A e B.

Figura 32 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 225kVA

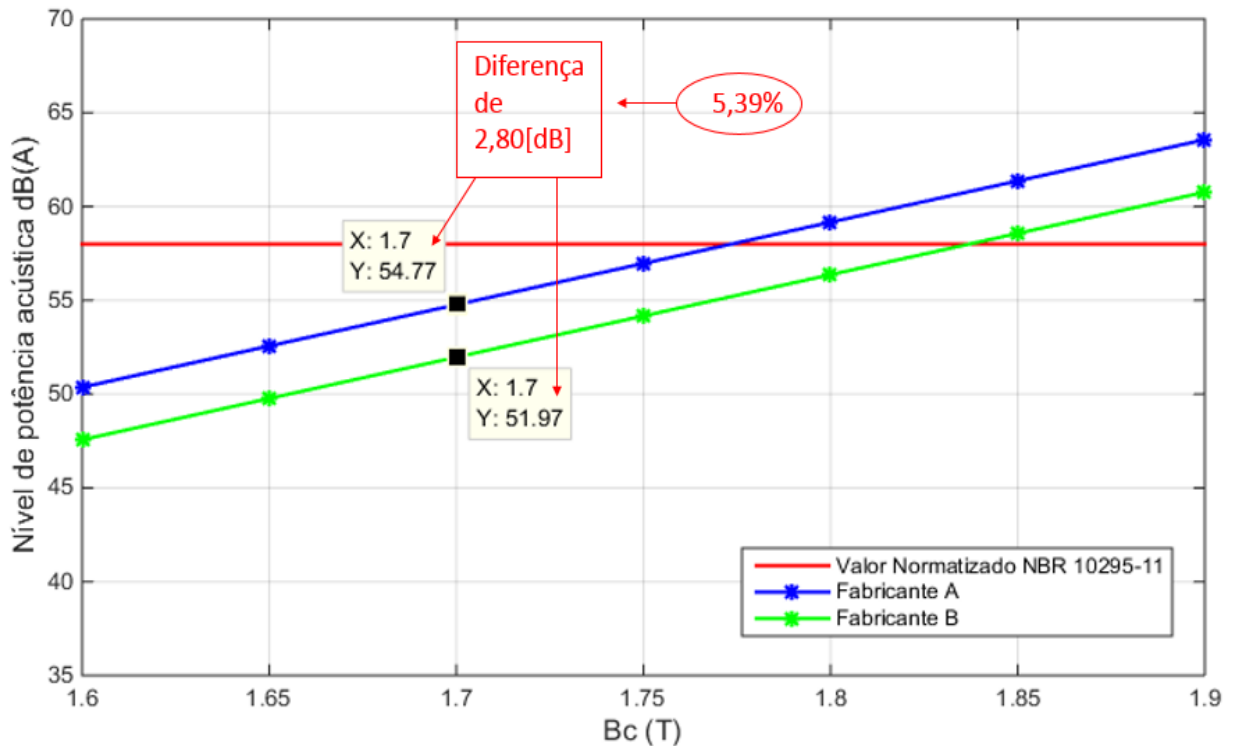


Fonte: Autoria própria

Como apresentado, o fabricante A apresentou um nível de ruído de 54,34[dB] e o fabricante B 51,04[dB]. Com isso percebe-se uma diferença de 3,30[dB] ou seja 6,47% entre fabricante A e o fabricante B, sendo o primeiro com um nível de ruído menor, para o transformador de 225kVA. Tanto o fabricante A como o fabricante B apresentam um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 10295-11. Como mencionado anteriormente, nesse caso com uma diferença de 3,30[dB], será pouco perceptível ao sistema auditivo humano.

A Figura 33 apresenta a simulação realizada com o transformador de 300kVA, dos fabricantes A e B.

Figura 33 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 300kVA



Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado, o fabricante A apresentou um nível de ruído de 54,77[dB] e o fabricante B 51,97[dB]. Com isso percebe-se uma diferença de 2,80[dB] ou seja 5,39% entre fabricante A e o fabricante B, sendo o primeiro com um nível de ruído menor, para o transformador de 300kVA. Tanto o fabricante A como o fabricante B apresentam um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 10295-11. Como mencionado anteriormente, nesse caso com uma diferença de 2,80[dB], será pouco perceptível ao sistema auditivo humano.

5.2 Medições

Todas as medições foram realizadas seguindo as especificações dos processos de medição contidos na norma NBR 7277/2013, sobre a determinação do nível de ruído, sendo os ensaios realizados no laboratório do fabricante A. O fabricante forneceu o valor do nível de ruído (transformador mais o ambiente, em decibéis) em cada um dos pontos de medição, nesse caso oito pontos de medição,

sendo possível elaborar uma tabela com todos os dados, inclusive o cálculo do valor médio do ruído do transformador em questão.

Posteriormente realizou-se a comparação entre os valores simulados e a média dos valores medidos, para mostrar o desempenho do algoritmo proposto, e a verificação dos mesmos perante a norma NBR 10295-11.

Para o transformador de 45kVA, foi elaborada a Tabela 4, como mencionado anteriormente, com os dados dos valores medidos de cada um dos microfones usados no ensaio, conforme sua respectiva norma, e também com o cálculo do valor médio da somatória das oito medições.

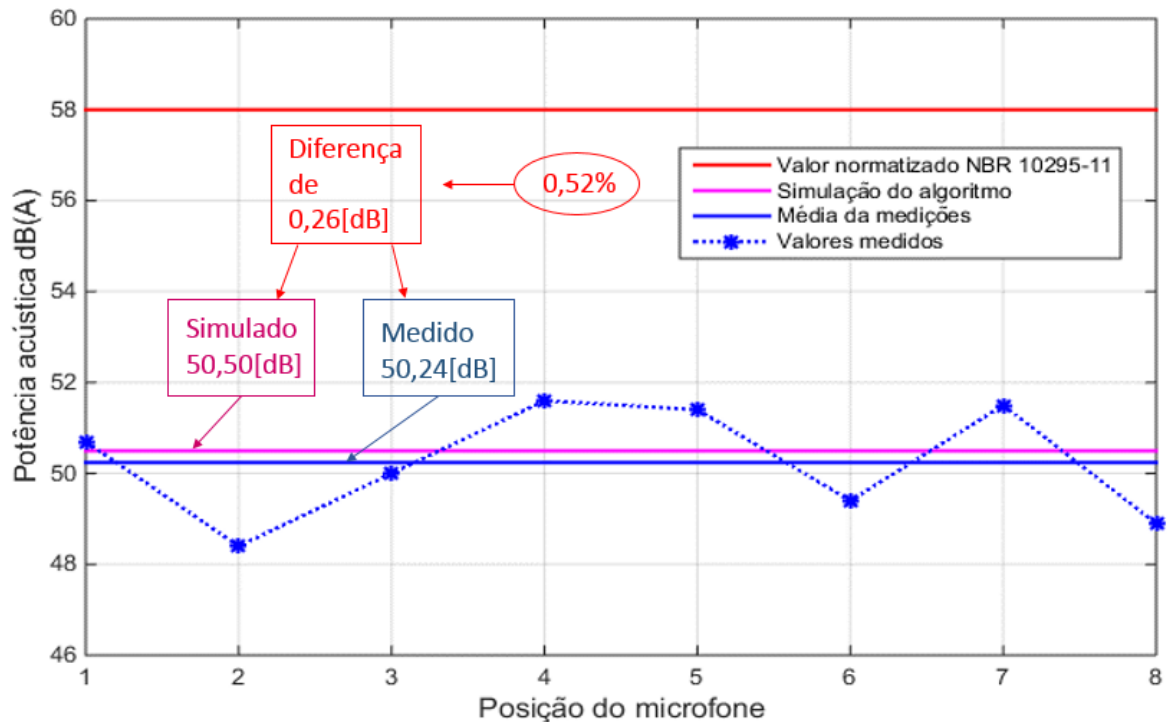
Tabela 4 - Valores de ruído medido para o transformador de 45kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	50,7
2	48,4
3	50
4	51,6
5	51,4
6	49,4
7	51,5
8	48,9
Média	50,24

Fonte: Aatoria própria

Abaixo tem-se a Figura 34, que apresenta o valor normatizado pela NBR 10295-11, o valor encontrado pela simulação do algoritmo, média dos valores das medições realizadas pelo fabricante e o valor de ruído para cada um dos 8 pontos medidos de cada um dos microfones utilizados no ensaio, para o transformador de 45kVA.

Figura 34 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 45kVA



Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 34, o valor simulado foi de 50,50[dB], e o valor médio das medições de 50,24[dB], apresentando uma diferença de 0,26[dB]; uma diferença de 0,52% entre o valor simulado e o real. Com esses dados é possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, com um resultado satisfatório dentro desta faixa de precisão. Os resultados dos valores de ruído reais e simulados também estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 10295-11.

Para o transformador de 75kVA foi elaborada a Tabela 5, como mencionado anteriormente, que também contém os dados dos valores medidos de cada um dos microfones usados no ensaio e o cálculo do valor médio da somatória das oito medições.

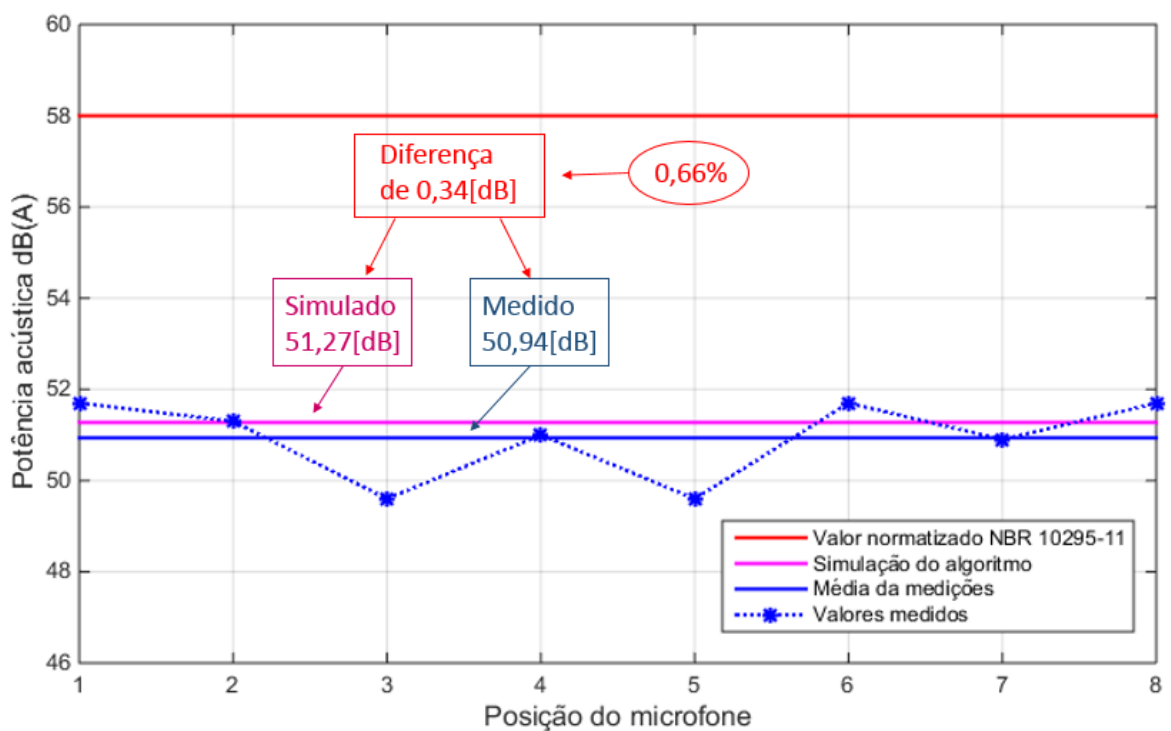
Tabela 5 - Valores de ruído medido para o transformador de 75kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	51,7
2	51,3
3	49,6
4	51
5	49,6
6	51,7
7	50,9
8	51,7
Média	50,94

Fonte: Autoria própria

A Figura 35 apresenta o valor normalizado pela NBR 10295-11, o valor encontrado pela simulação do algoritmo, média das medições realizadas pelo fabricante e também o valor de ruído para cada um dos 8 pontos de medição, para o transformador de 75kVA.

Figura 35 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 75kVA



Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 35 o valor simulado foi de 51,27[dB] e o valor médio das medições 50,94[dB] apresentando uma diferença de 0,34[dB], sendo uma diferença de 0,66% entre o valor simulado e o real. Nos resultados dos valores de ruído reais e simulados, além de satisfatórios, eles também estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 10295-11.

Para o transformador de 112,5kVA, foi elaborada a Tabela 6, que contém os dados dos valores medidos de cada um dos microfones usados no ensaio e o cálculo do valor médio da somatória das oito medições.

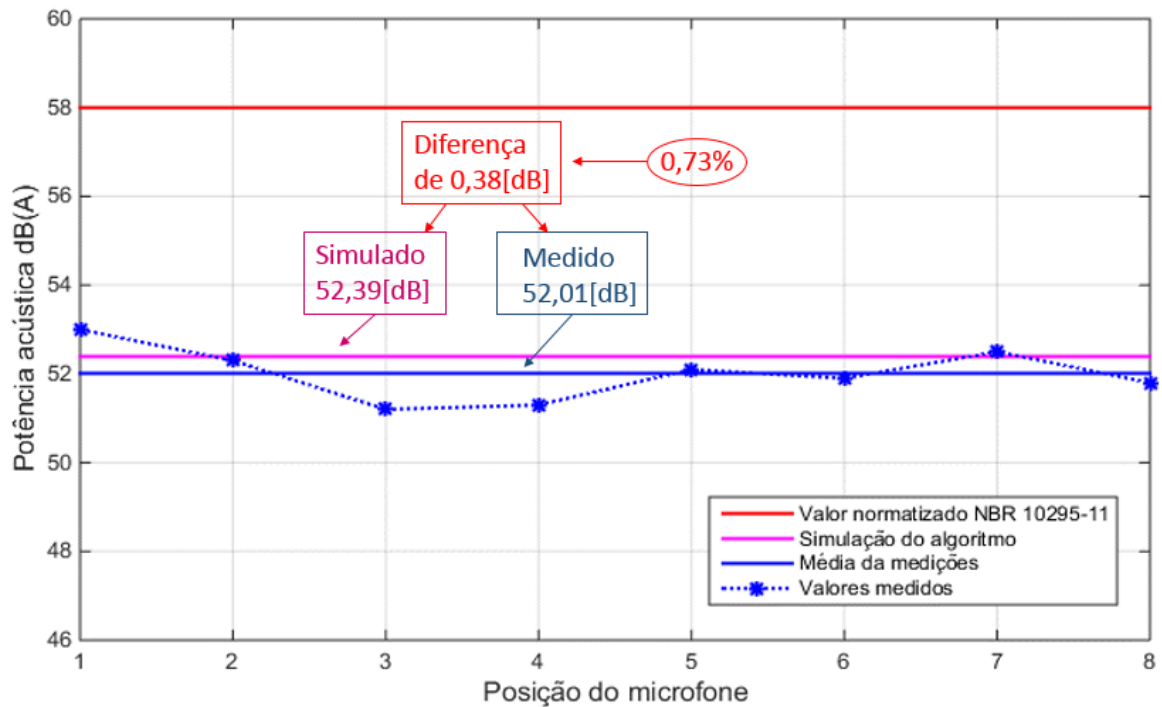
Tabela 6 - Valores de ruído medido para o transformador de 112,5kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	53
2	52,3
3	51,2
4	51,3
5	52,1
6	51,9
7	52,5
8	51,8
Média	52,01

Fonte: Autoria própria

A seguir a Figura 36 apresenta o valor normatizado pela NBR 10295-11, o valor encontrado pela simulação do algoritmo, a média das medições realizadas pelo fabricante e também o valor de ruído para cada um dos 8 pontos medidos no ensaio pelo microfone de medição, para o transformador de 112,5kVA.

Figura 36 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 112,5kVA



Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 36, o valor simulado obtido para o nível de potência acústica foi de 52,39[dB] e o valor médio obtido por meio das medições foi de 52,01[dB], apresentando uma diferença de 0,38[dB]; uma diferença de 0,73% entre o valor simulado e o real. Os resultados dos valores de ruído reais e simulados também estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 10295-11.

Para o transformador de 150kVA, foi elaborada a Tabela 7, que contém os dados dos valores medidos do nível de pressão acústica (ruído) do transformador em funcionamento, e para cada um dos oito pontos definidos no ensaio foi realizada uma medição, além do cálculo do valor médio da somatória do resultado obtido das oito medições.

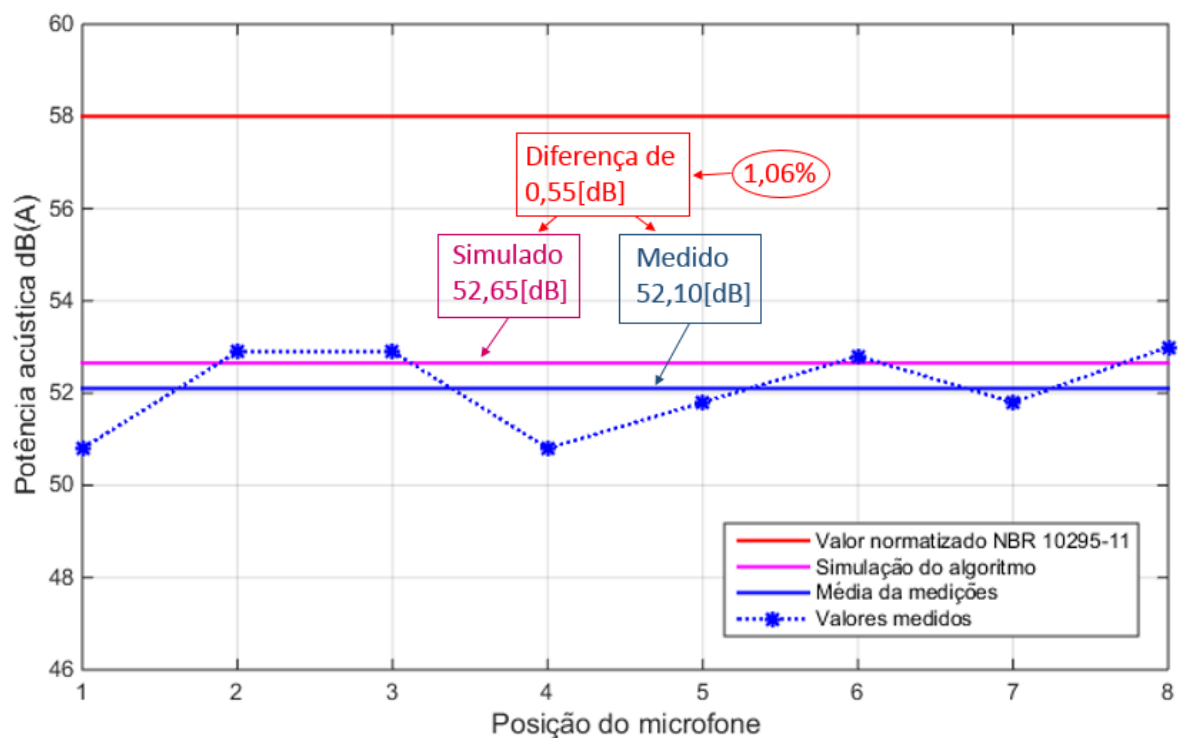
Tabela 7 - Valores de ruído medido para o transformador de 150kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	50,8
2	52,9
3	52,9
4	50,8
5	51,8
6	52,8
7	51,8
8	53
Média	52,1

Fonte: Autoria própria

A Figura 37 apresenta o valor normalizado pela NBR 10295-11, o valor encontrado pela simulação do algoritmo, média das medições realizadas pelo fabricante e também o valor de ruído para cada um dos 8 pontos de medição, para o transformador de 150kVA.

Figura 37 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 150kVA



Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 37, o valor simulado foi de 52,65[dB] e o valor médio das medições 52,10[dB], apresentando uma diferença de 0,55[dB]; 1,06% entre o valor simulado e o real. Os resultados dos valores de ruído reais e simulados também estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 10295-11.

Para o transformador de 225kVA, foi elaborada a Tabela 8, que contém os dados dos valores medidos de cada um dos microfones usados no ensaio e o cálculo do valor médio da somatória das oito medições.

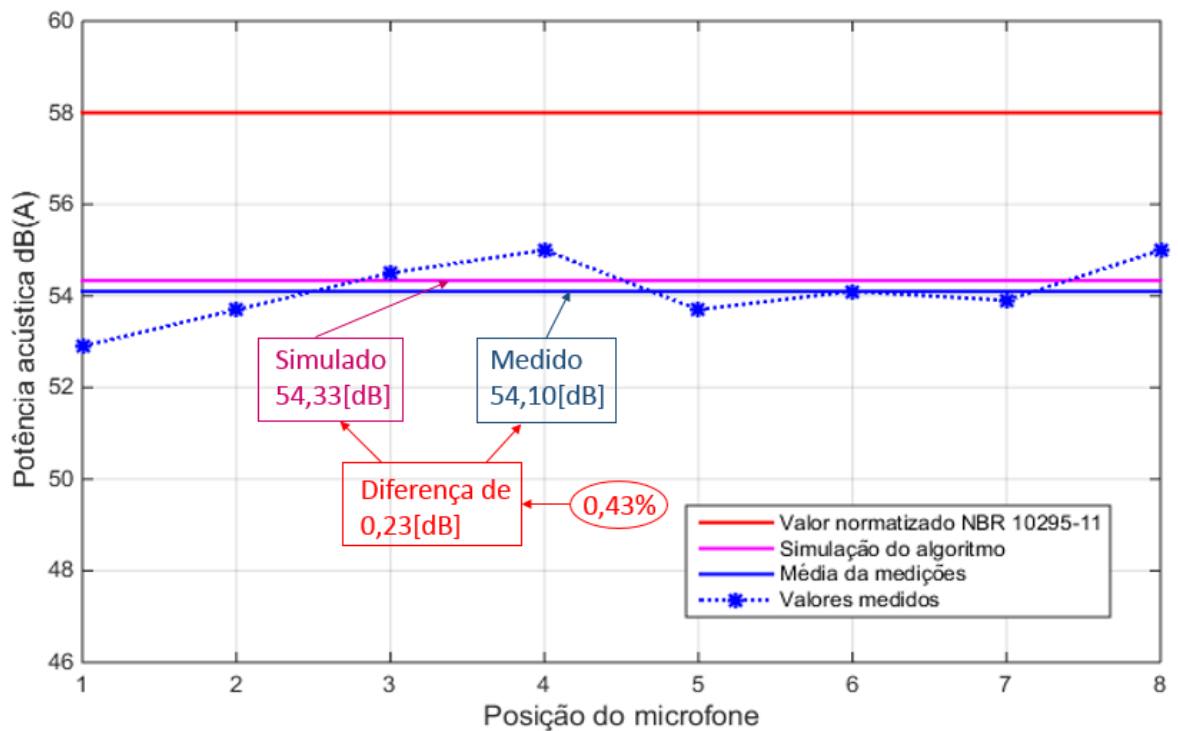
Tabela 8 - Valores de ruído medido para o transformador de 225kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	52,9
2	53,7
3	54,5
4	55
5	53,7
6	54,1
7	53,9
8	55
Média	54,1

Fonte: Autoria própria

A Figura 38 apresenta o valor normatizado pela NBR 10295-11, o valor encontrado pela simulação do algoritmo, média das medições realizadas pelo fabricante e o valor de ruído para cada um dos 8 pontos de medição, para o transformador de 225kVA.

Figura 38 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 225kVA



Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 38 o valor simulado foi de 54,33[dB] e o valor médio das medições 54,10[dB] apresentando uma diferença de 0,23[dB] (diferença de 0,43% entre o valor simulado e o real). Os resultados dos valores de ruído reais e simulados também estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 10295-11.

Para o transformador de 300kVA, foi elaborada a Tabela 9, contendo os dados dos valores medidos do nível de pressão acústica (ruído) do transformador em funcionamento, para cada um dos oitos pontos definidos no ensaio foi realizada uma medição, também foi realizado o cálculo do valor médio da somatória do resultado obtido das oito medições.

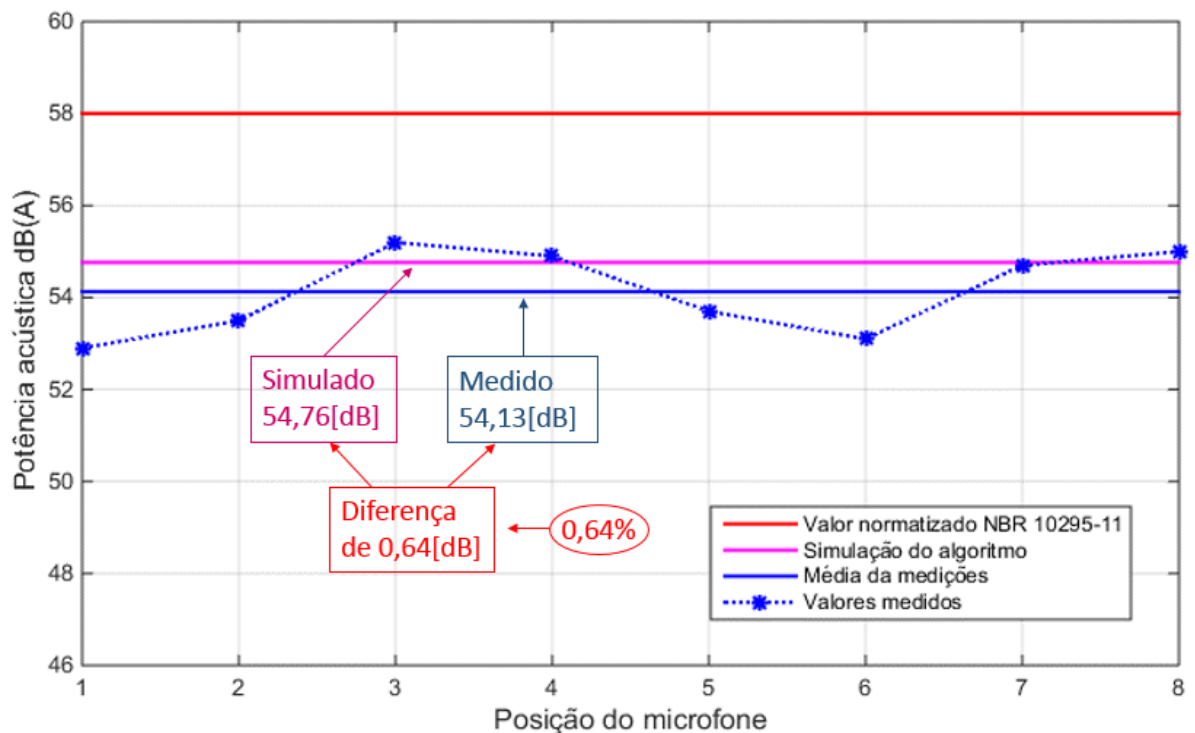
Tabela 9 - Valores de ruído medido para o transformador de 300kVA

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	52,9
2	53,5
3	55,2
4	54,9
5	53,7
6	53,1
7	54,7
8	55
Média	54,13

Fonte: Autoria própria

A Figura 39 apresenta o valor normalizado pela NBR 10295-11, o valor encontrado pela simulação do algoritmo, média das medições realizadas pelo fabricante e também o valor de ruído para cada um dos 8 pontos de medição, para o transformador de 300kVA.

Figura 39 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 300kVA



Fonte: Autoria própria

Como apresentado na Figura 39 o valor simulado foi de 54,76[dB] e o valor médio das medições 54,13[dB] apresentando uma diferença de 0,64[dB] (uma diferença de 0,64% entre o valor simulado e o real). Os resultados dos valores de ruído reais e simulados também estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 10295-11.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHO FUTUROS

6.1 Considerações finais

Com este trabalho percebe-se que a escolha do tipo de transformador pode ter um impacto ambiental muito grande. Recomenda-se o transformador a seco para instalações internas que exigem segurança e confiabilidade, menos manutenção e agridem menos o meio ambiente, a sua sustentabilidade ambiental (ou a falta da mesma) são itens que devem ser considerados pela empresa antes da escolha.

Um dos aspectos presente e frequentemente negligenciado no funcionamento do transformador elétrico é o ruído produzido pela sua operação que constitui uma fonte de poluição sonora, uma característica importante destes equipamentos quando destinados para zonas próximas de habitações. Felizmente nos últimos anos, a gradual utilização de transformadores elétricos tem sido acompanhada por um crescente interesse por transformadores silenciosos e do tipo a seco, de modo a que sua operação não cause incômodo à pessoas próximas.

O algoritmo adaptado utilizou 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], todos valores reais e fornecidos pelos dois fabricantes A e B. Com todos os dados 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 10295-11, conforme os gráficos apresentados neste estudo.

Como exemplo da indústria alemã, austríaca e Tcheca de geração de energia, em que o ruído autorizado dos transformadores de distribuição de potência de 50 kVA é de 42 dB, e o ruído autorizado dos transformadores de distribuição de energia de 1000 kVA é de 48 dB (requisitos prescritos pela RWE Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk), são significativamente exigências mais rigorosas do que na maioria dos sistemas de energia elétrica nacionais do mundo na qual o Brasil devia se espelhar e um dos motivos da realização e importância desta monografia.

6.2 Sugestões para trabalho futuros

Ao longo deste trabalho é possível apresentar algumas medidas que podem ser adotadas para se reduzir o ruído em transformadores a seco, de origem eletromagnéticas, e suas conseqüentes vibrações mecânicas.

Inicialmente, na construção do transformador, deve-se levar em conta o material de que é feito o transformador e o tipo de montagem, porque possui um efeito importante sobre os níveis de ruído do transformador, como por exemplo a adição de silício no núcleo do transformador, influenciando diretamente na magnetostrição, conseqüentemente em seu ruído, o empilhamento das lâminas isoladas entre si e o número de lâminas por camada, que influenciam na dimensão do entreferro e no nível de ruído, assim como o tipo de junção das camadas do núcleo, como o *step-lap* que gera um decréscimo de aproximadamente cinco a sete decibéis no nível de ruído para indução típica de operação. O uso de condutores retangulares nos enrolamentos, uma excelente técnica para melhorar o assentamento das espiras e, por conseqüência, a susceptibilidade aos movimentos mecânicos decorrentes das vibrações. Os enrolamentos prensados contra o núcleo com calços elásticos, propiciam desacoplamento das vibrações do núcleo, fazendo com que o transformador apresente nível de ruído semelhante aos daqueles em líquido isolante. Outro fator importante é a escolha do sistema de ventilação, que deve ser cuidadosamente estudada pela sua contribuição para o nível de som audível geral.

Outras medidas podem ser adotadas na instalação do transformador em seu local de operação, como por exemplo evitar a instalação em um canto da cela ou cubículo perto do teto. Três cantos atuam como “megafones” e amplificam o som.

Instalar conexões flexíveis em todos os cabos ou conexões de entrada e saída para reduzir a transmissão de vibração. Se preciso, materiais de absorção acústica podem ser montados sobre as superfícies para reduzir a transmissão de som e possível amplificação. Os transformadores devem ser montados sobre um suporte firme com absorvedores de vibração ou molas adequadamente projetadas, que irão reduzir a transmissão de som consideravelmente.

Os transformadores a seco possuem parafusos de transporte e sustentação do núcleo do transformador de modo que a unidade não seja danificada no

transporte do fabricante para o local de destino. Muitas vezes, uma instalação mal feita, sem a remoção e ajuste de algumas peças, como parafusos, de acordo com as recomendações do fabricante, geram uma fonte de ruído adicional.

Para a instalação em uma armação estrutural, parede, teto ou coluna. Usar a técnica de montagem com calços flexíveis, que funcionam como “amortecedores de vibração flexíveis”.

Casos especiais em que seja necessário que o transformador produza menos intensidade de ruídos, ainda há dois métodos disponíveis. O método passivo, que consiste basicamente na inserção de uma barreira acústica entre a fonte sonora (o transformador) e os receptores (as pessoas no entorno), que em geral é possível atenuação de até 12 dB em situações onde as habitações se encontram sob a sombra acústica gerada por esta barreira, sendo as maiores desvantagens o custo financeiro, uma dificuldade maior em sua manutenção e ventilação destes transformadores.

Outro método é o controle ativo de ruído, sugerido em 1933 na Alemanha, onde sua implementação só se tornou viável a partir de 1980. A idéia básica consiste na geração de um sinal de cancelamento secundário que se oponha ao sinal primário procedente da fonte geradora da perturbação, no caso o transformador. As dificuldades práticas para se atingir este objetivo não são triviais, pois existe a necessidade de se atingir uma distribuição espacial precisa do sinal de cancelamento, a velocidade requerida para o processamento de sinais, a solução ótima para o processamento de sinais, sendo necessário um estudo detalhado para cada caso, gerando um alto custo não só pela análise do caso, como também para a instalação dos equipamentos de alta tecnologia necessários.

REFERÊNCIAS

- ANSI/IEEE C57.12.00, “**IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers**”, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5034: **Buchas para tensões alternadas superiores a 1kV**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-3: **Transformador de Potência**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5440: **Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos**. 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 9119: **Produtos laminados planos de aço para fins elétricos de grão orientado**. Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10295: **Transformadores de potência secos - Especificação**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039: **Instalações Elétricas de Média Tensão de 1kV a 36kV**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10151: **Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade**. Rio de Janeiro, 2000.
- CAMARGO, Jelson M. **Análises do Desempenho Térmico e Vida Útil de Transformadores Alimentando Cargas Não Lineares**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- CAVALHEIRO, R. D.; PAVAN, A. D. **Estudo comparativo entre transformadores a óleo e a seco**. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP, 2013.
- CHAPMAN, Stephen J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2012.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2ª ed. New Jersey: IEEE Press, John Wiley & Sons, 2009.

DINIZ, Fabiano B. **Impacto Ambiental das Emissões Sonoras de Subestações de Energia Elétrica na cidade de Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, 2003.

FERREIRA, Jeferson G. **Estudo do Ruído em Transformadores de Distribuição da Classe 15kv em Função da Indução do Núcleo**. Monografia apresentada para conclusão de curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procopio, 2015.

FERREIRA, Jorge L. **Proposes for reduction and attenuation of noises coming from electrical high-power transformers and substations**. PROMEC-UFRGS, 2006.

FIGURA, C. A. **Caracterização dos níveis de ruído em uma casa noturna**. Monografia de especialização – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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.

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

GERGES, S. N. Y. **Ruído, Fundamentos e Controle**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Ruídos, Florianópolis-SC, 2000.

JORGE, Pedro M. B. S., **Estudo sobre o ruído originado pela magnetostrição em transformadores de potência**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2015.

LANDGRAF, Fernando J. G., **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2012.

MASIERO, Bruno S. **Controle Ativo de Ruído para Transformadores de Potência em Campo**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

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

MOSES, A. J. **Electrical steels: past, present and future developments**. IEE Proceedings A (Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education), Volume 137, Issue 5, 1990.

NOGUEIRA, D. S.; ALVES D. P. **Transformadores de Potência – Teoria e Aplicação**. Dissertação – Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

OCÓN, Rodrigo V. **Sistemas Selectos de transformadores de Potência – Workshop – CIGRÉ - Comitê Nacional Mexicano**, 2011.

PETROVIC, A.; LUKIC, L.; KOLAREVIC, M.; LUKIC, D. **Noise measurements of the power transformers**. 23rd National Conference & 4th International Conference Noise and vibration, 2012.

SAMBAQUI, Ana B. K. **Apostila de Máquinas Elétricas I**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina Joinville, 2008.

SERAFIM, Emerson S. **Transformadores Elétricos**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2009.

RON, A. Widup. **Dry-Type Power Transformers: Understanding Transformer Isolation and Noise**. Shermco Industries. Neta World, 2010.

SEVERINO, Aguinaldo M. **Magnetostricção – Revisão e tendências**. Departamento de Física – UFSM (Santa Maria-RS), 2009.

SIEMENS S.A. **GEAFOL – Transformadores a seco de 75 a 25.000 kVA**. Siemens Jundiaí-SP, 2007.

TOLEDO, Thalita F. **Siliciação de aço silício**. Dissertação (Mestrado) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – UFOP – CETEC - UEMG, 2007.

VALKOVIC, Z. Influence of the Transformer Core Design on Power Losses. In: **IEEE Transaction on Magnetic**, n^o2, 1982. v. MAG-18, p. 801-804.

VIEIRA, S. I. **Manual de Saúde e Segurança do Trabalho**. 2.ed. São Paulo: LTR, 2009.

WEG S.A. **Características e especificações de transformadores de distribuição e força DT-11**. Blumenau: Weg, 2010. 218p.