

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

**JEFERSON GONÇALVES FERREIRA**

**ESTUDO DO RUÍDO EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO  
DA CLASSE 15kV EM FUNÇÃO DA INDUÇÃO DO NÚCLEO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2015**

**JEFERSON GONÇALVES FERREIRA**

**ESTUDO DO RUÍDO EM TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO  
DA CLASSE 15kV EM FUNÇÃO DA INDUÇÃO DO NÚCLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado com requisito parcial à obtenção do título Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em: Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio.

Coorientador: Prof. Me. Jancer Frank Zanini Destro.

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

2015



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



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Jeferson Gonçalves Ferreira**

**Estudo do ruído em transformadores de distribuição da classe 15kV em função da indução do núcleo**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:30hs do dia 10/06/2015 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 - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

---

Prof(a). Me(a). Demerval Mizuyama - (Membro)

Dedico esse trabalho a Deus por mais esse sonho concretizado, aos meus pais Genesio e Ivanil e a minha namorada Mirian.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me guiar, sempre estar presente em minha vida e me amar. Mostrando-me seu imenso carinho em tantos momentos da minha vida.

Agradeço aos meus pais, Genesio e Ivanil, pelos conselhos e esforços e pelo infinito amor e incentivo que me fizeram chegar até neste momento.

Agradeço a minha namorada, Mirian, que sempre me incentivou e me apoiou para a realização dos meus ideais, encorajando-me a enfrentar todos os momentos difíceis da vida. Obrigado Mirian por sempre acreditar em mim, motivar-me e por teu imenso e sincero amor.

Agradeço ao meu orientador Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio, pelos ensinamentos repassados a mim, pela confiança depositada na realização deste trabalho pelas demonstrações de amizade, atenção e apoio.

Agradeço aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e ajuda constante, sem o qual não poderia ter atingido o sucesso que obtive no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio e a todos seus funcionários pela disponibilidade e amizade.

" Quanto maior o conhecimento,  
menor o ego.  
Quanto maior o ego  
menor o conhecimento."

**Albert Einstein**

## RESUMO

FERREIRA, Jeferson Gonçalves. **Estudo do ruído em transformadores de distribuição da classe 15kV em função da indução do núcleo.** 2015. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

Este trabalho tem como objetivo estudar as principais fontes geradoras de ruído em transformador de distribuição da classe 15kV, os processos necessários para execução dos ensaios dentro do laboratório do fabricante como estabelecidos pela NBR 7277/2013. Desenvolver um algoritmo para simulações de níveis de ruído de transformadores através de seus aspectos construtivo, mostrando como o ruído se comporta mediante variação da indução magnéticas na chapa do núcleo. Realizar o comparativo entre os valores encontrados com o algoritmo desenvolvido e os valores medidos no laboratório do fabricante, verificando sua eficiência e se os valores estão de acordo com os exigidos pela NBR 5356-3/2014. Propondo sugestões de melhoria para projetos futuros.

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

## ABSTRACT

FERREIRA, Jeferson Gonçalves. **Study of noise in distribution transformers of 15kV class as a function of induction core** 2015. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

This work aims to study the main sources of noise in the distribution transformer of 15kV class, 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 5356-3 / 2014. Proposing suggestions for improvement for future projects.

**Keywords:** Transformers. Noise Analysis. Generating Sources of Noise.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Fontes de ruído em transformador.....	14
Figura 2.1 - Micrografia de uma chapa de FeSi com GNO .....	21
Figura 2.2 - Micrografia de uma chapa de FeSi com GO .....	21
Figura 2.3 - Frequência da rede x frequência do ruído .....	22
Figura 2.4 - Aplicação de um campo magnético .....	22
Figura 3.1 - Representação esquemática de um transformador .....	25
Figura 3.2 - Representação de um transformador ideal .....	26
Figura 3.3 - Representação das perdas Joule do transformador .....	28
Figura 3.4 - Representação da dispersão no transformador .....	28
Figura 3.5 - Representação das perdas no ferro do transformador.....	28
Figura 3.6 - Representação da permeabilidade do fluxo do transformador.....	29
Figura 3.7 - Representação do transformador real.....	29
Figura 3.8 - Enrolamento de um transformador : (a) baixa tensão; (b) alta tensão ...	30
Figura 3.9 - Tanque do transformador.....	31
Figura 3.10 - Buchas do transformador.....	31
Figura 3.11 - Radiador de um transformador .....	32
Figura 3.12 - Comutador .....	32
Figura 3.13 - Placa de identificação do transformador .....	33
Figura 3.14 - Movimento do óleo isolante no transformador .....	34
Figura 4.1 - A propagação de uma onda ao nível de partícula.....	37
Figura 4.2 - Espectro de ruído do transformador.....	39
Figura 4.3 - Nível de ruído medido no núcleo do transformador .....	40
Figura 4.4 - Ressonância no núcleo do transformador.....	41
Figura 4.5 - Nível de ruído dos equipamentos auxiliares de refrigeração .....	42
Figura 4.6 - Ponto de medição .....	43
Figura 5.1 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 15kVA .....	45
Figura 5.2 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 30kVA .....	46
Figura 5.3 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 45kVA .....	47
Figura 5.4 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 75kVA .....	47
Figura 5.5 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 112,5kVA ....	48
Figura 5.6 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 150kVA .....	49

Figura 5.7 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 15kVA.....	50
Figura 5.8 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 30kVA.....	51
Figura 5.9 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 45kVA.....	52
Figura 5.10 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 75kVA.....	53
Figura 5.11 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 112,5kVA.....	55
Figura 5.12 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 150kVA.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Níveis de ruídos para transformadores a óleo de acordo com a potência nominal igual ou inferior a 500kVA. ....	36
Tabela 5.1 – Valores de ruído medido para o transformador de 15kVA.....	50
Tabela 5.2 – Valores de ruído medido para o transformador de 30kVA.....	51
Tabela 5.3 – Valores de ruído medido para o transformador de 45kVA.....	52
Tabela 5.4 – Valores de ruído medido para o transformador de 75kVA.....	53
Tabela 5.5 – Valores de ruído medido para o transformador de 112,5kVA.....	54
Tabela 5.6 – Valores de ruído medido para o transformador de 150kVA.....	55

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Db	Decibéis
Fem	Força Eletromotriz
GNO	Grão não Orientado
GO	Grão Orientado
MATLAB	Matrix Laboratory
NBR	Norma Brasileira

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	METODOLOGIA DE PESQUISA	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	17
<b>2</b>	<b>AÇOS ELÉTRICOS E MAGNETOSTRICÇÃO</b>	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 orientado	19
2.2	MAGNETOSTRICÇÃO	21
<b>3</b>	<b>TRANSFORMADOR DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	23
3.1	INTRODUÇÃO	23
3.2	CONCEITOS BÁSICOS	24
3.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	24
3.4	NORMALIZAÇÕES	26
3.5	TRANSFORMADOR IDEAL	26
3.6	MODELO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR REAL	27
3.7	COMPONENTES CONSTRUTIVOS	30
3.7.1	Parte ativa	30
3.7.2	Acessórios Complementares	31
3.8	TRANSFORMADORES A ÓLEO	33
<b>4</b>	<b>SOM E RUÍDO</b>	36
4.1	PROPAGAÇÃO DO SOM	37
4.2	PRESSÃO SONORA	37
4.3	POTÊNCIA ACÚSTICA EMITIDA PELO TRANSFORMADOR	38
4.4	FONTES GERADORAS DE RUÍDO EM TRANSFORMADORES A ÓLEO	39
4.4.1	Ruído do Núcleo do Transformador	40
4.4.2	Ruído Causado por Forças Eletromagnéticas	41
4.4.3	Ruído de Ventiladores e Bombas	41

4.5	PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÕES .....	42
4.5.1	Ensaio para Medições do Nível de Ruído .....	42
4.5.2	Condições de Operação do Equipamento Durante a Medição .....	43
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES .....</b>	<b>45</b>
5.1	SIMULAÇÕES .....	45
5.2	MEDIÇÕES.....	49
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHO FUTUROS .....</b>	<b>57</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS .....	57
6.3	PUBLICAÇÕES .....	58
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

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

Todo transformador em operação emite um ruído, a magnitude deste ruído aumenta com o aumento de sua potência. É muito comum ter um transformador elétrico próximo a sua casa, pois é um equipamento essencial para funcionamento do sistema elétrico (FINOCCHIO; FERREIRA; DESTRO, 2014).

A causa básica de ruído do transformador é magnetostricção, a expansão e contração do núcleo de ferro (lâminas), devido ao efeito magnético da corrente que flui através de alternância das bobinas de transformadores. Produzindo um zumbido audível. A magnetostricção pode ser parcialmente controlada através da concepção do transformador, não podendo ser totalmente eliminada. O ruído do sistema de ventilação geralmente é acobertado pelo ruído gerado pela vibração estrutural do transformador.

Existem basicamente três fontes de geração de ruído em transformador, como pode ser observado na Figura 1.1:

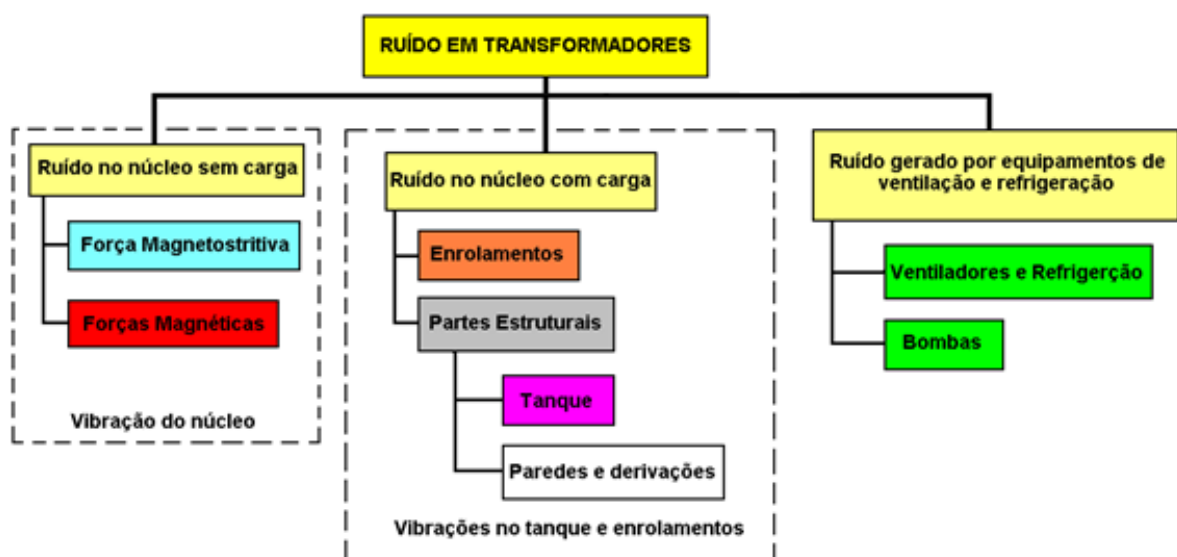


Figura 1.1 - Fontes de ruído em transformador  
Fonte: Finocchio (2014).

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

Em virtude da variação da tensão aplicada, o campo magnético variável é produzido, e estes campos magnéticos variáveis são responsáveis pela alteração das dimensões do material ferromagnético utilizado como componente do transformador produzindo vibrações (SHENGCHANG; YANMING; CHENG, 2005). Estas vibrações apresentam uma fonte de som com ruído característico dos transformadores como "zumbido".

Antes da década de 60 o ruído gerado por transformadores tinha importância secundária. Atualmente o ruído acústico se tornou um tipo de poluição sonora que é uma forma de poluição ambiental o que se fez se ter mais estudos e normas para diminuí-los.

Em contexto federal, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece que níveis de ruído são prejudiciais à saúde e ao sossego público, e esses níveis não podem ultrapassar os valores regido pela norma (NBR 10151, 2000), como padrão de qualidade ambiental do ar. A norma estabelece para ambientes com área mista, predominantemente residencial o nível máximo de 50dB(A) noturno e 55dB(A) diurno, e porém, o período noturno não deve começar 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 antes das 9h.

A preocupação com o ruído audível emitido por equipamentos elétricos dentro de ambientes industriais surgiu no início do século XX, mais o estudo sistemático do comportamento acústico de subestações elétricas teve início na década de 1960. Assim, durante as décadas seguintes o ruído de transformadores investigados tem diminuído consideravelmente (RODRIGUES; MEDEIROS;



PAVANELLO, 1998). No Brasil, estes estudos são mais recentes, com os primeiros trabalhos datados na década de 1980. Com o crescimento das cidades e maior preocupação com a lei ambiental, é a partir de 1900 que começaram os primeiros projetos de adequação do nível de ruído nas subestações (FERREIRA, 2006).

Assim, o uso de transformadores precisa ser sempre algo planejado e estudado, de modo que o mesmo atenda perfeitamente à necessidade do projeto e com isso atenda suas expectativas.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta seção visa apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos, expondo claramente o escopo deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivos Geral

Realizar um estudo sobre o nível de ruído causado em transformadores de distribuição trifásicos a óleo na faixa de 15kVA a 150kVA, com classe de tensão de 15kV. E o desenvolvimento de um algoritmo via Matrix Laboratory (MATLAB) para obter valores de ruídos através de simulações, traçando o comparativo entre a norma vigente e os valores encontrados pelas simulações e os valores reais medidos. Apontando melhorias, que servira de base comparativa para futuros projetos de transformadores.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar as principais causas dos ruídos nos transformadores;
- Investigar a importância do nível de ruído em um transformador;
- Realizar 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

Este trabalho está organizado visando inicialmente a fornecer o conhecimento básico necessário, para a compreensão da atenuação e ruído dos transformadores. Demonstrando como são realizados os ensaios das medições nos laboratórios dos fabricantes e no decorrer da pesquisa apresentar suas causas.

Apresentar os resultados e procedimentos de medição de forma sucinta, pois é um assunto superficialmente abordado pela literatura técnica atual, principalmente em termos de procedimentos de medição.

Implantação do algoritmo para realizar as simulações, as quais serão realizadas com dados construtivos fornecidos por dois fabricantes de transformadores a óleo. Verificando se os valores de ruído encontrado nas simulações estarão coerentes com os valores medidos no laboratório do fabricante, bem como se os mesmos estão de acordo com os valores regidos pela NBR 5356-3.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Esta monografia está dividida em seis capítulos, distribuídos da seguinte forma.

O capítulo 2, faz comentários sobre aços elétricos e o fenômeno magnetostricção.

O capítulo 3 apresenta informações referentes aos transformadores elétricos, tais como princípio de funcionamento, transformador ideal, modelos equivalente de um transformador real, parte construtivas e uma breve abordagem sobre transformadores a óleo.

O capítulo 4 aborda uma fundamentação teórica envolvendo propagação sonora, pressão sonora, potência acústica emitida por um transformador, as principais fontes geradoras de ruído em transformadores a óleo e os procedimentos utilizados nos ensaios para medições de nível de ruído.

O capítulo 5, apresenta os resultados encontrado 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 juntamente com a sugestão para projetos futuros.

## 2 AÇOS ELÉTRICOS E MAGNETOSTRICÇÃO

### 2.1 AÇOS ELÉTRICOS

#### 2.1.1 Tipos e propriedades dos aços elétricos

Os materiais magnéticos moles mais utilizados nos núcleos de máquinas elétricas são os chamados *aços elétricos* (MOSES, 1990). Estes materiais 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

Os primeiros transformadores construídos em 1880 usavam aços de baixo carbono, isto é, com teores inferiores a 0,03% C (CULLITY; GRAHAM, 2009). São aços com algumas impurezas indesejadas de carbono, normalmente sob a forma de cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Na atualidade não são mais usados na fabricação de equipamentos elétricos de potência, embora continuem a ser empregados na construção de pequenos motores onde as perdas magnéticas não são um fator importante, mas sim o baixo custo. Podendo ser citados como exemplos os motores de aspiradores, de máquinas de lavar roupa e de brinquedos.

#### 2.1.3 Aços de grão orientado

A descoberta dos aços de grão orientado (GO) por Norman P. Goss em 1933 (CULLITY; GRAHAM, 2009). Observou que os aços silício quando laminados a frio (ao contrário dos de GO que eram laminados a quente) com recozimentos intermediários, a uma temperatura varia entre 900 e 1100°C (MOSES, 1990), e acabando o processo com um recozimento a cerca de 1200°C, se consegue chapas

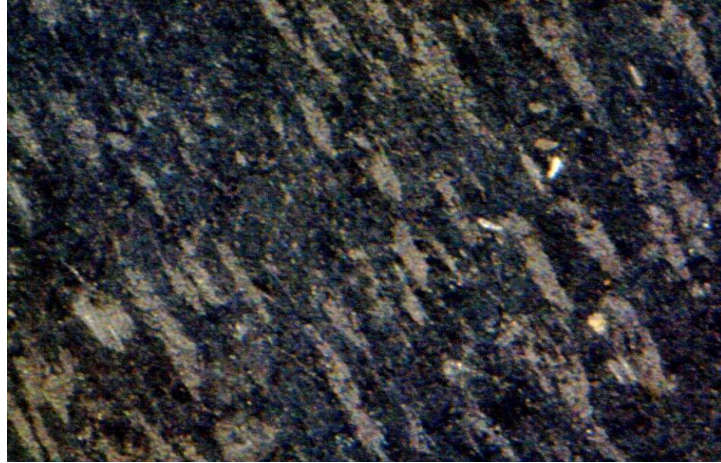
com propriedades magnéticas muito superiores às obtidas por laminação a quente (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Esta melhoria deve-se ao fato de existir uma recristalização secundária que ocorria durante o recozimento a alta temperatura e que conduzia à obtenção de uma textura magneticamente favorável, que passou a ser conhecida por textura de Goss. Nesta textura uma das direções preferenciais de magnetização de cada grão, é a direção paralela à direção de laminação e paralela ao plano da chapa, conseguindo-se obter excelentes propriedades magnéticas segundo a direção de alinhamento do grão. As chapas de GO entraram no mercado a cerca de 20 anos depois da sua descoberta, e ainda hoje se procura melhorar as suas propriedades (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Atualmente, o teor de silício na chapa varia entre 3,2% a 2,2% sendo que as chapas são produzidas com espessuras não superiores a 0,35mm e em que o tamanho médio do grão é superior a 0,5mm de diâmetro, isto é, só existe um grão na espessura da chapa (LANDGRAF, 2012). Os aços de GO são os mais utilizados nos transformadores onde se privilegia uma direção preferencial de magnetização, ao contrário do que acontece nas máquinas rotativas.

Em 1965 a Nippon Steel Corporation produziu um novo tipo de aço de grão orientado que foi designado por aço de GO de elevada permeabilidade (*high permeability grain oriented steel* – HGO, para diferenciá-lo do *conventional grain oriented steel*-CGO). Neste material era adicionado 0,025% de alumínio ao aço fundido com o objetivo de melhorar a orientação da textura Goss. Apesar do produto final possuir uma melhor orientação, ele tinha também maior tamanho médio de grão, isto é, com cerca de 1cm de diâmetro (MOSES, 1990), o que aumenta as perdas dinâmicas no material. Nas Figuras 2.1 e 2.2 são observadas duas micrografias de aços de GNO e GO, respectivamente.

Estas imagens foram obtidas por meio do microscópio digital Celestron modelo 44306 com ampliação de 200x.



**Figura 2.1 - Micrografia de uma chapa de FeSi com GNO**  
**Fonte: Autoria própria.**



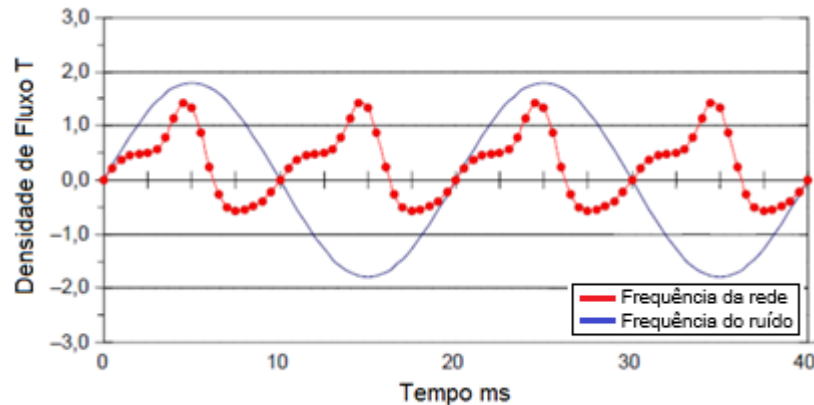
**Figura 2.2 - Micrografia de uma chapa de FeSi com GO**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 2.2 MAGNETOSTRICÇÃO

A Magnetostricção é um fenômeno encontrado somente em materiais ferromagnético tais como ferro, níquel, cobalto e suas ligas. Quando estes materiais são magnetizados pela presença de um campo magnético, eles sofrem uma distorção microscópica em sua estrutura molecular, causando uma variação em suas dimensões longitudinais.

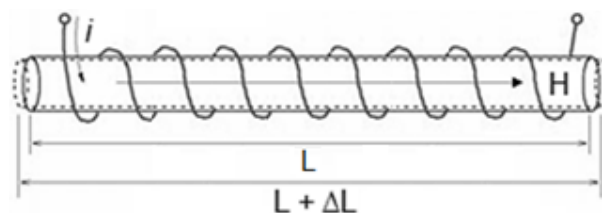
Então esta resposta mecânica ao campo magnético é chamada de magnetostricção e seu efeito magnetostrictivo mais conhecido é o ruído no transformador em operação. Este ruído vem da contração cíclica do núcleo dos transformadores, que possuem um alto valor da constante de magnetostricção.

Nos sistemas CA (corrente alternada), como transformadores e reatores, onde são aplicados campos magnéticos de 60Hz, a mudança de amplitude acontece duas vezes por ciclo, produzindo o um ruído característico de 120Hz. Esta frequência é típica dos circuitos elétricos brasileiros que trabalham em 60Hz. Na Figura 2.3 é mostrada a frequência da rede e também a frequência do ruído.



**Figura 2.3 - Frequência da rede x frequência do ruído**  
**Fonte: Adaptado de Ocón (2011).**

A magnetostricção pode ser positiva se, na presença do campo magnético o material se expandir e também pode ser negativa caso aconteça o contrário. Nos dois casos o volume não varia porque na direção perpendicular a deformação se produz uma deformação proporcional de sinal contrário. A Figura 2.4, mostra a aplicação de um campo magnético ao longo do eixo do material, e sua deformação correspondente, medida em termos da variação do comprimento relativa ao comprimento original.



**Figura 2.4 - Aplicação de um campo magnético**  
**Fonte: Autoria própria.**

A deformação que se apresenta é independente do sinal do campo aplicado, ou seja, é unipolar e se manifesta com campos magnéticos em ambos os sentidos.

### 3 TRANSFORMADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

No estudo da eletricidade, considera-se que ela atua como um excelente meio de transporte de energia de um ponto a outro, devido as suas características de grande capacidade de transmissão, grande flexibilidade de distribuição na medida do consumo, rapidez, não poluição, eficiência e confiabilidade (MARIANO, 2001).

Sabe-se que a energia elétrica, produzida em grande quantidade nas usinas, precisa ser transmitida até os centros consumidores e distribuída a cada consumidor. Para o transporte da energia até os pontos de utilização, não bastam fios e postes, toda a rede de distribuição depende dos transformadores, que elevam e abaixam a tensão. Assim os transformadores melhoram a eficiência do processo e também reduzem custos em relação a transmissão a distância.

Os níveis de tensão mais usados globalmente, e em particular no Brasil, que se referem aos valores de tensão de linha no caso trifásico são:

- Transmissão: 230kV, 440kV, 500kV, 600 kV(CC), 750kV;
- Subtransmissão: 69kV, 138kV;
- Distribuição primária: 11,9kV, 13,8kV, 23kV, 34,5kV;
- Distribuição secundária: 115V, 127V, 220V;
- Sistemas industriais: 220V, 380V, 440V, 2,3kV, 4,16kV e 6,6kV.



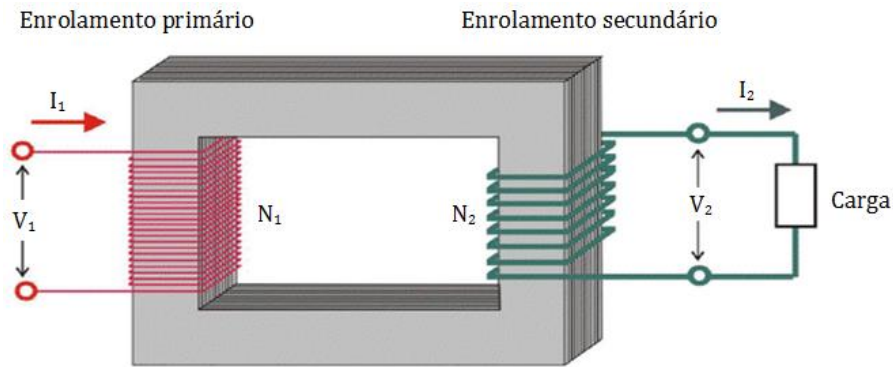
### 3.2 CONCEITOS BÁSICOS

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define o transformador como “um dispositivo que por meio da indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a mesma frequência, mas, geralmente, com tensões e intensidades de correntes diferentes”. Assim, o transformador é um conversor de energia eletromagnética, cuja operação pode ser explicada em termos do comportamento de um circuito magnético excitado por uma corrente alternada (SERAFIM, 2009).

O transformador é um componente significativo do sistema elétrico e responsável por possibilitar desde a geração da energia elétrica a sua transferência em tensões mais econômicas, permitindo que a energia seja utilizada numa tensão adequada para cada dispositivo. Além disso, o transformador também se faz importante ao casar as impedâncias entre uma fonte e sua carga, transferindo o máximo de potência possível, isolando circuitos e/ou isolando a corrente contínua permitindo que se continue com a corrente alternada entre dois circuitos.

### 3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Trata-se de um dispositivo constituído de dois ou mais enrolamentos acoplados num mesmo circuito magnético (CHAPMAN, 2012). O transformador, representado na Figura 3.1, é constituído por dois enrolamentos e por um fluxo magnético comum responsável por seu acoplamento. Ao ser conectado a uma fonte de tensão alternada, qualquer dos enrolamentos, por exemplo, o primário, produz um fluxo alternado com amplitude dependente da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e número espiras. Com isso, tem-se um fluxo comum que ao ser induzido no secundário lhe garante uma tensão com valor relativo ao seu número de espiras. Assim, a partir da relação entre o número de espiras do primário e do secundário é possível se obter qualquer relação de tensão/transformação existente (NEVES; MUNCHOW, 2011).



**Figura 3.1 - Representação esquemática de um transformador**  
**Fonte: Neves; Munchow (2011).**

A relação entre as tensões do primário e do secundário é dada pela Equação 3.1,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (3.1)$$

onde:

- a = relação de transformação;
- $N_1$  = número de espiras do primário;
- $N_2$  = número de espiras do secundário;
- $V_1$  = tensão no primário [V];
- $V_2$  = tensão no secundário [V].

Se o número de espiras do primário é maior que o número de espira do secundário, a tensão no secundário é menor que a tensão do primário, e o transformador é abaixador. Caso ocorra o contrário, será elevador. Portanto para transformador abaixador,  $a > 1$  e para o elevador de tensão,  $a < 1$ .

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

E devido ao fato do transformador possuir um rendimento bem elevado, a potência de entrada é aproximadamente igual a potência de saída. Com isso a variação de tensão é acompanhada de uma variação, de forma inversa da corrente. Isso significa que sempre que aumentar a tensão irá diminuir a corrente.

### 3.4 NORMALIZAÇÕES

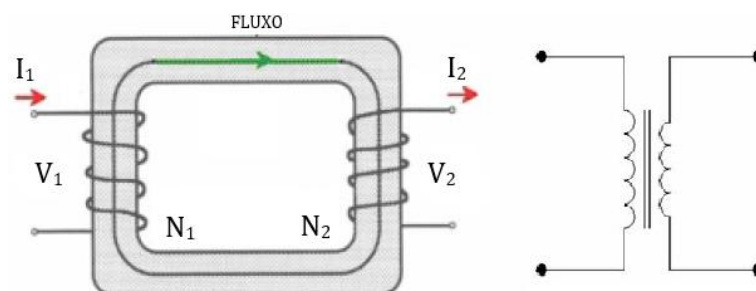
Como o estudo dos transformadores envolve as principais grandezas elétricas, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) desenvolveu normas nacionais de operação, construção, manutenção e uso dos mesmos. Segundo a NBR 5440-2014, as potências padronizadas para transformadores de distribuição, em kVA, são:

- Transformador monofásico instalado em poste: 3; 5; 10; 15; 25; 37,5; 50; 75 e 100kVA.
- Transformador trifásico instalado em poste: 15; 30; 45; 75; 112,5 e 150kVA.
- Transformador trifásico instalado em plataforma: 225; 300; 500; 750 e 1000kVA.

### 3.5 TRANSFORMADOR IDEAL

As relações básicas que descrevem um transformador monofásico podem ser obtidas ao se considerar o modelo ideal do transformador. Para esse modelo, a permeabilidade magnética do núcleo ferromagnético é infinita, o que confina o fluxo totalmente ao núcleo fazendo com que não haja fluxos de dispersão, e as perdas elétricas (potência dissipada na resistência dos enrolamentos) e magnéticas (histerese do núcleo) são nulas (MARIANO, 2001).

A Figura 3.2 mostra a representação de um transformador ideal:



**Figura 3.2 - Representação de um transformador ideal**  
**Fonte: Mariano (2001).**

Como o fluxo que enlaça o enrolamento do primário e do secundário são os mesmos e induz uma força eletromotriz (fem) neste. Aplicando a Lei de Faraday nos dois enrolamentos tem-se,

$$V_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$V_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

onde:

$\frac{d\phi}{dt}$  : taxa de variação do fluxo magnético no tempo [Wb/s];

Como sabe-se,  $N_1$  e  $N_2$  correspondem ao número de espiras no primário e no secundário, assim, dividindo-se a Equação 2.2 pela Equação 2.3, tem-se.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.4)$$

Outro fato que pode ser considerado já que o transformador ideal não tem perdas, portanto  $a = 1$ , é a equivalência entre sua potência aparente de entrada e saída:

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.5)$$

Assim, com a Equação 2.5 pode-se escrever a relação de corrente do transformador, que será dado pela Equação 2.6:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.6)$$

### 3.6 MODELO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR REAL

O circuito equivalente de um transformador real é constituído por resistências e indutâncias, tal que cada um deles são responsáveis por um desvio em relação ao transformador ideal.

A inserção da resistência  $R_1$  e  $R_2$  representam as perdas Joule nos enrolamentos, como mostrado na Figura 3.3, que são as resistências próprias dos enrolamentos primário e secundário.

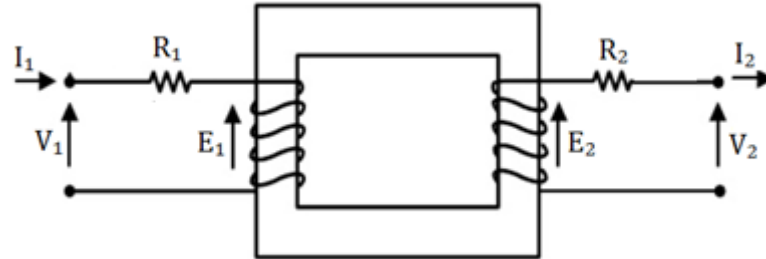


Figura 3.3 - Representação das perdas Joule do transformador  
Fonte: Sambaqui (2008).

Os efeitos do fluxo de dispersão no primário e no secundário do transformador são simulados por reatâncias indutivas, denominadas reatância de dispersão, tais que as quedas de tensão nessa reatância são numericamente iguais as parcelas de fem's induzida pelos respectivos fluxos de dispersão (SAMBAQUI, 2008). A Figura 3.4 mostra a representação da dispersão nos enrolamentos primário e secundário.

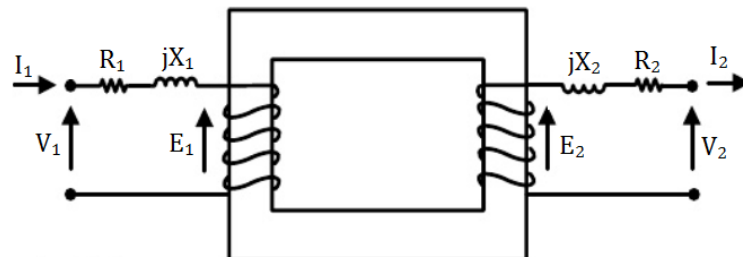


Figura 3.4 - Representação da dispersão no transformador  
Fonte: Sambaqui (2008).

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 3.5.

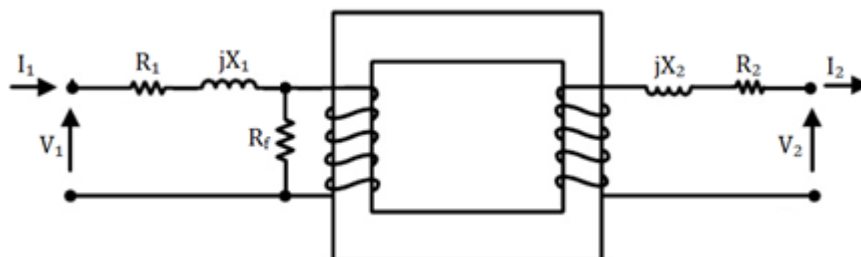
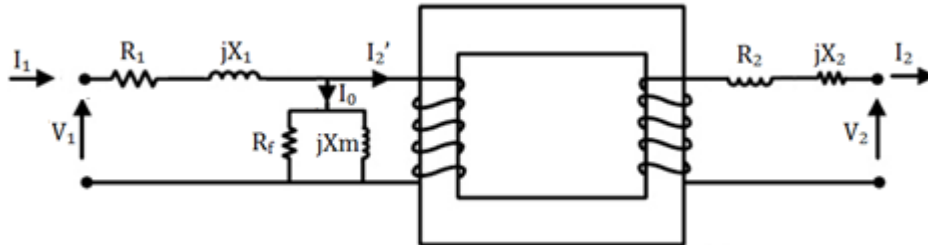


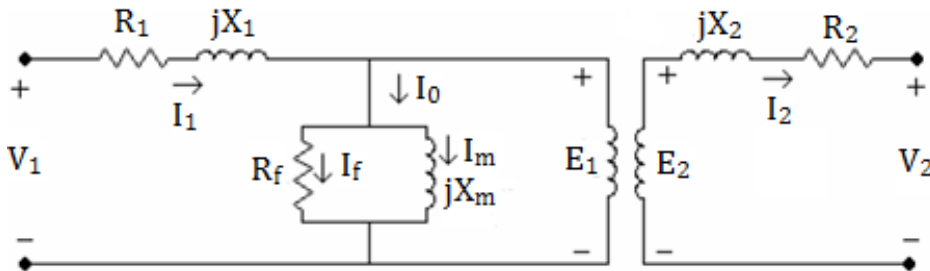
Figura 3.5 - Representação das perdas no ferro do transformador  
Fonte: Sambaqui (2008).

O efeito da permeabilidade finita do fluxo ferromagnético é representado inserindo uma reatância indutiva em paralelo com a *fem* induzida, pela qual flui a corrente  $I_0$  (SAMBAQUI, 2008). Essa reatância, é apresentada na Figura 3.6, é denominada reatância de magnetização do transformador.



**Figura 3.6 - Representação da permeabilidade do fluxo do transformador**  
Fonte: Sambaqui (2008).

Assim, o circuito equivalente do transformador real é mostrado na Figura 3.7,



**Figura 3.7 - Representação do transformador real**  
Fonte: Adaptado de Nasar (1998).

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, [ $\Omega$ ];

$R_f$  - perdas no ferro, [ $\Omega$ ];

$X_1, X_2$  - indutância de dispersão, [ $\Omega$ ];

$X_m$  - reatância de magnetização, [ $\Omega$ ];

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

$I_0$  - corrente de excitação [A];

$I_m$  - corrente de magnetização [A];

$I_f$  - corrente no ferro [A].

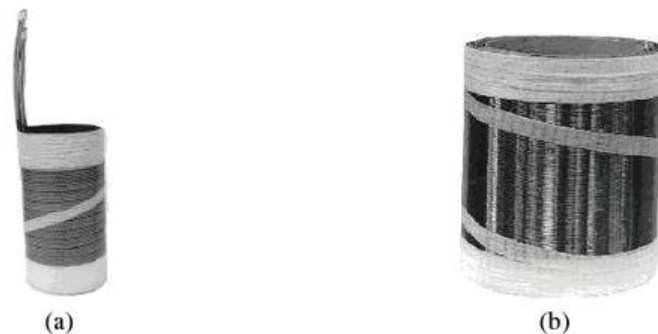
### 3.7 COMPONENTES CONSTRUTIVOS

Os transformadores são basicamente constituídos por duas partes, uma é chamada de parte ativa e a outra de acessórios complementares.

#### 3.7.1 Parte ativa

A parte ativa é formada pelas bobinas (enrolamentos do primário e do secundário) e o núcleo ferromagnético, tem um funcionamento eficaz, é quando seus componentes estão prensados e devidamente calçados, podendo assim suportar as diversas condições ambientais a que podem ser submetidos.

Na maioria das vezes os enrolamentos são constituídos de fios de cobre, de seção retangular ou circular, estando isolados com esmalte ou papel. De acordo com a Figura 3.8, normalmente os enrolamentos de baixa tensão e alta tensão são concêntricos, de forma que a baixa tensão ocupa a parte interna e a alta tensão a parte externa, sendo divididos em bobinas de menor número de espiras, pelo fato de garantir uma melhor isolamento, facilidade de manutenção e retirada das derivações para conexão ao comutador.



**Figura 3.8 - Enrolamento de um transformador : (a) baixa tensão; (b) alta tensão**  
Fonte: Neves; Munchow (2011).

Por sua vez, o núcleo é constituído de lâminas de material ferromagnético, que é 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 surgem devido a variação de fluxo ocorridos sobre o material pelo fato desse ser condutor. (SERAFIM, 2009).

### 3.7.2 Acessórios Complementares

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

O tanque de acordo com a Figura 3.9 tem o papel de ser o invólucro da parte ativa e de recipiente do líquido isolante, tendo os suportes para fixação em postes, ganchos e olhais de suspensão, tampa de inspeção, conector de aterramento, fios de passagem das buchas, placa de identificação, radiadores, dispositivos de drenagem e amostragem do líquido isolante, visor de nível do óleo, etc.



**Figura 3.9 - Tanque do transformador**  
Fonte: Neves; Munchow (2011).

As buchas são dispositivos de porcelana que têm a finalidade de isolar os terminais das bobinas do tanque do transformador. Como mostrada na Figura 3.10.



**Figura 3.10 - Bucha do transformador**  
Fonte: Autoria própria.

Os radiadores são instalados na parte externa do tanque, como mostrado na Figura 3.11, fazem a circulação do óleo isolante através de suas aletas, que em contato com o ar ambiente, diminuem a temperatura do óleo.

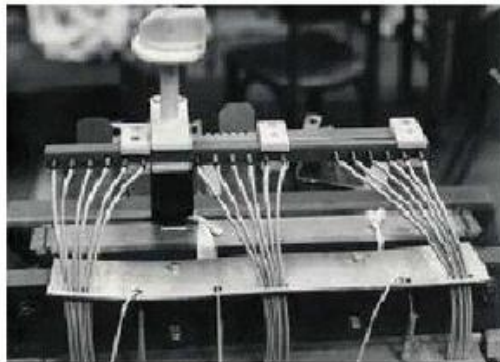


A circulação pode ser do tipo natural (ONAN – óleo natural, ar natural), ou pode ser do tipo forçada através de moto ventiladores nos radiadores (ONAF – óleo forçado, ar forçado), utilizando moto bombas para aumentar o fluxo do óleo (OFAF – óleo forçado, ar forçado), com sistema de óleo dirigido nas bobinas (ODAF – óleo dirigido, ar forçado) ou mesmo com trocadores de calor que utilizam água como meio refrigerante ao invés do ar ambiente (OFWF – óleo forçado, água forçada).



**Figura 3.11 - Radiador de um transformador**  
**Fonte: WEG (2010).**

O comutador é um dispositivo mecânico, que possibilita a variação do número de espiras dos enrolamentos de alta tensão, de acordo com a Figura 3.12, tem como finalidade corrigir o desnível de tensão que existe nas redes de distribuição, devido à queda de tensão ocorrida ao longo das mesmas.



**Figura 3.12 - Comutador**  
**Fonte: Neves; Munchow, (2011).**

A placa de identificação é feita de alumínio ou aço inoxidável, é responsável por conter todas as informações construtivas resumidas e normatizadas do aparelho, conforme exemplo da Figura 3.13. Entre suas importantes informações tem-se: nome e dados do fabricante; numeração da placa; indicação das NBR; potência (kVA); impedância equivalente (%); tensões nominais (AT e BT); tipo de óleo

isolante; diagramas de ligações; diagrama fasorial; massa total (kg); volume total do líquido (l).

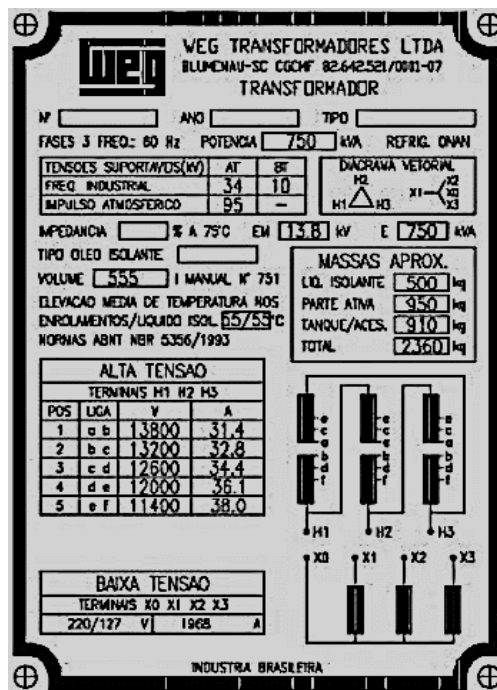


Figura 3.13 - Placa de identificação do transformador  
Fonte: Neves; Munchow (2011).

### 3.8 TRANSFORMADORES A ÓLEO

Em todos os transformadores se faz necessário alguma forma de resfriamento, o que é de grande importância para o transformador, já que, o mesmo é um equipamento de grande eficiência, que apresenta perdas no núcleo e no cobre (AZEVEDO; MOURA, 2012).

Uma parte da potência do transformador é dissipada por efeito Joule, na forma de calor, de modo que se a temperatura interna do equipamento chegar a valores críticos apresenta uma deterioração da isolação entre os condutores, o que poderá causar um curto-circuito interno, diminuindo a eficiência do equipamento, sua vida útil e envelhecimento do óleo isolante.

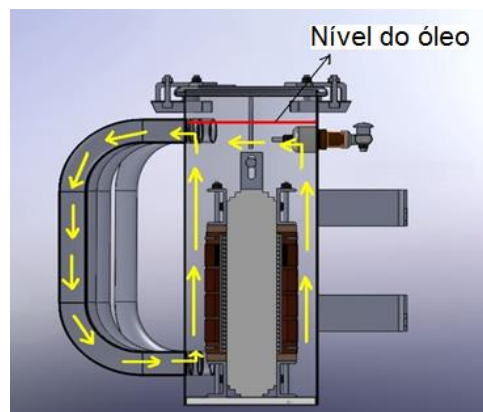
Diante dessa necessidade de refrigeração, tem-se como tipos de resfriamento o a seco e por óleo isolante.

O transformador a óleo possui seu sistema isolante composto por uma parte sólida, formada pelo papel isolante, e por uma parte líquida, caracterizada pelo óleo

isolante, que juntos têm a função de garantir a rigidez dielétrica e mecânica do bobinado (BICKOWSKI, 2011).

Sendo imerso em líquido isolante, o transformador a óleo precisa de um tanque de aço que garante que sua parte ativa, composta pelo núcleo e bobinas, fique completamente imersa no líquido isolante. Diante dessa necessidade, o líquido isolante possui como finalidades isolar os elementos sob tensão do tanque e possibilitar que os arcos elétricos internos ao transformador, devido às diferenças de tensão entre o primário e o secundário e tanque (carcaça), sejam rapidamente interrompidos (AZEVEDO; MOURA, 2012).

A outra finalidade importante que o óleo isolante tem, é a de resfriar o transformador. Circulando no tanque, o óleo retira o calor das bobinas e se aquece, precisando ser novamente resfriado. Essa refrigeração do óleo pode ser feita pelo ar, através de movimento natural ou forçado por ventiladores; ou pela água, com o uso de serpentinas. Nesses dois casos, o resfriamento do óleo é possível graças ao processo de convecção, mostrado na Figura 3.14. Na convecção, o óleo quente sobe e passa a circular pelas aletas, assim ocorre sua refrigeração retornando para o tanque do transformador. Este retorno ocorre devido ao fato do óleo frio ser mais pesado, que vai forçar sua entrada no tanque do transformador, refrigerando as bobinas e dando início a um novo ciclo.



**Figura 3.14 - Movimento do óleo isolante no transformador**  
**Fonte: Adaptado de (Sigma, 2012).**

Além desse processo natural, o ar frio pode ser impelido para o transformador através de ventiladores que forçam sua passagem através das aletas de forma contínua.

Por fim, a refrigeração também pode ser feita pela água que extrai o calor do óleo para esse retirar o calor das bobinas e núcleo. Nesse método, a água é o agente dissipador do calor, que refrigera o óleo, ao circular através de serpentinas de cobre (tubo) colocadas na parte superior interna do tanque e dentro do óleo. (GLOBALTECH, 2015).

Os óleos minerais isolantes são determinados tipos de óleo básicos extraídos do petróleo, que depois de tratamentos específicos podem ser destinados à utilização em transformadores, reatores, chaves elétricas, disjuntores, religadores, etc.

O óleo isolante é um produto secundário no processo de destilação do petróleo bruto para produzir gasolina, contendo etapas de tratamento a ácido e extração por solvente ou hidrogenação. Sua produção pode empregar tanto os óleos naftênicos denominado comercialmente como óleo isolante mineral do tipo A, quanto os parafínicos denominado comercialmente como óleo isolante mineral do tipo B.

Os parafínicos são compostos de ligas química relativamente estáveis e resistentes e não podem ser modificadas facilmente com influências químicas, dificultando sua oxidação em temperaturas ambiente ou levemente elevadas. Por conterem em sua composição química hidrocarbonetos de parafina em maior proporção, eles apresentam uma densidade menor e são menos sensíveis a alteração de viscosidade e temperatura. A desvantagem é que as parafinas tendem a se sedimentam em baixas temperaturas (LEOPOLDINO, 2011).

Os naftênicos compõem-se em sua maioria de ciclos e, em geral são usados quando se necessita produzir lubrificantes para baixa temperaturas. E apresenta como desvantagem a incompatibilidade com materiais sintéticos e elastômeros.

Como visto, no transformador, o óleo isolante é utilizado simultaneamente como isolante e refrigerante. Para exercer a função de isolar, o óleo deve ser isento de umidade e de contaminantes e para resfriar deve possuir baixa viscosidade e baixo ponto de fluidez para facilitar sua circulação (REV, 2005).

## 4 SOM E RUÍDO

O som, em termos físicos, é a sensação devida às flutuações de pequena escala da pressão do ar em torno da pressão atmosférica média local (SCHULTZ, 1982).

Na realidade, qualquer meio elástico pode propagar o som, mas a propagação no ar é a mais importante no escopo do presente trabalho. Dependendo da natureza do som, essas flutuações podem ou não seguir padrões repetitivos. Através delas, energia é transmitida pelo meio gasoso, líquido ou sólido pelo qual o som se propaga, a partir da fonte sonora (HASSEL; ZAVERI, 1998).

O ruído é definido como som indesejável (HASSEL; ZAVERI, 1998). Normalmente, é o resultado de atividades humanas do dia a dia, tais como, trabalho, lazer, pode ser considerado como ruído. Portanto, a diferença entre som e ruído reside apenas na percepção subjetiva das pessoas, pois constituem o mesmo fenômeno físico.

Os transformadores emitem um zumbido característico. Em áreas menos populosa, esta é uma pequena preocupação, mas em áreas urbanas, pode causar desconforto e descumprir o regulamento de emissão de ruído. Os quais são estabelecidos pela norma NBR 5356-3/2014 – Transformadores de Potência. Esta norma determina que os níveis de ruídos produzidos pelos transformadores não podem ultrapassar os limites estabelecidos, da Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Níveis de ruídos para transformadores a óleo de acordo com a potência nominal igual ou inferior a 500kVA.**

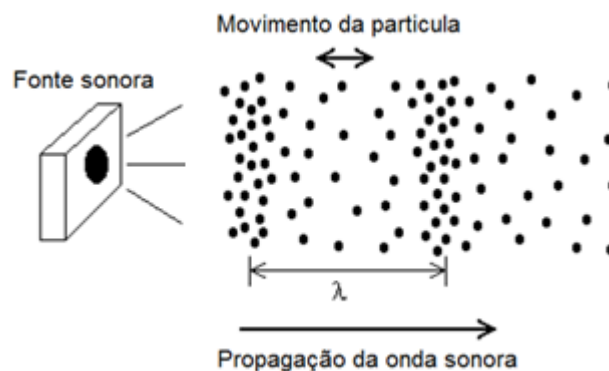
Nível médio de ruído dB(A)	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos kVA
48	1 – 50
51	51 – 100
55	101 – 300
56	301 - 500

Fonte: NBR 5356-3 / 2014.

## 4.1 PROPAGAÇÃO DO SOM

Para estudar a propagação do som no meio, é necessário analisar esse meio ao nível da partícula. Se for excitado por uma vibração mecânica, uma partícula se desloca da sua posição de equilíbrio por uma pequena distância. Essa partícula deslocada acaba por empurrar a sua vizinha na mesma direção, enquanto que ela retorna à posição de equilíbrio. A vizinha então causa um deslocamento em sua próxima vizinha e assim, passa a ocorrer de uma partícula para a outra.

Se analisar uma partícula separadamente ela irá apresentar um movimento oscilatório de pequeno deslocamento, mas esse movimento é propagado pelas diversas partículas do meio no que se caracteriza como uma onda. Podendo ser transmitida através dessa onda, como mostrada na Figura 4.1.



**Figura 4.1 - A propagação de uma onda ao nível de partícula**  
**Fonte: Adaptado de (Diniz, 2003).**

Dependendo do meio no qual o som está se propagando, o tempo necessário para a energia ser transferida de uma partícula para a sua vizinha varia. A causa direta desse fato é a mudança da velocidade do som de acordo com o meio.

## 4.2 PRESSÃO SONORA

Associa-se o som com o deslocamento das partículas de um meio elástico, em relação a 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).

Para efetuar o cálculo do nível médio de pressão acústica em transformadores imerso em óleo, a uma distância de 0,3m do transformador, para unidades com potência nominal inferior a 500kVA (OLIVEIRA, 2005), pode ser calculada pela Equação 4.1,

$$L_{pA} = 38 \cdot B_c + 20 \cdot \log(EE) - 63 \quad \text{dB(A)} \quad (< 500\text{kVA}) \quad (4.1)$$

onde:

$L_{pA}$  - nível médio de pressão acústica, em dB(A);

$B_c$  - Indução na chapa do núcleo (T);

$EE$  - Distância entre eixos (mm).

#### 4.3 POTÊNCIA ACÚSTICA EMITIDA PELO TRANSFORMADOR

Para deduzir o nível de potência acústica, ponderado na escala A,  $L_{WA}$  a partir do nível de ruído do equipamento sob medição, deve se utilizar a Equação 4.2 mostrada pela (NBR-7277, 2013),

$$L_{WA} = L_{pA} + 10 \cdot \log \frac{S}{S_0} \quad (4.2)$$

onde:

$L_{WA}$  - nível de potência acústica, em dB(A);

$L_{pA}$  - nível médio de pressão acústica, em dB(A);

$S_0$  - área de referência = 1 m<sup>2</sup>;

$S$  - área de superfície de medicao em metros quadrado.

A área  $S$  da superfície de medição em metros quadrados é calculada pela Equação 4.3, estabelecida pela (NBR-7277, 2013),

$$S = 1,25 \cdot h \cdot l_m \quad (4.3)$$

onde:

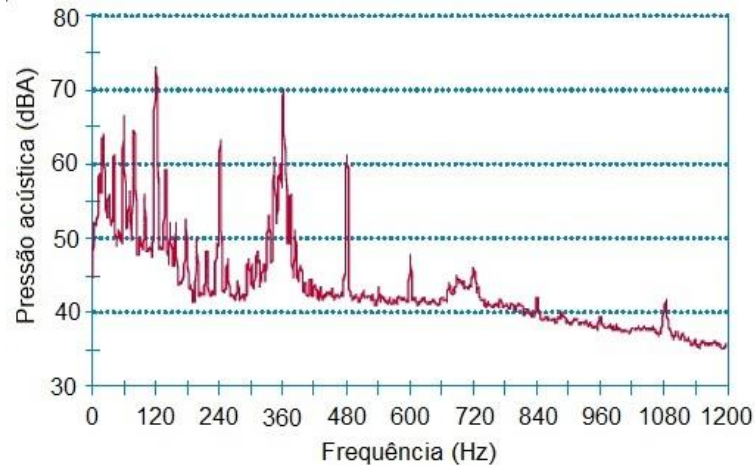
$h$  - altura do tanque do transformador em metros;

$l_m$  - comprimento da linha prescrita de contorno em metros.

#### 4.4 FONTES GERADORAS DE RUÍDO EM TRANSFORMADORES A ÓLEO

Estudos dos fabricantes dos transformadores, revelam que o ruído acústico gerado por um transformador tem origem nas suas vibrações eletromecânicas, no sistema de ventilação, no chaveamento e no efeito corona, entre outros, sendo que as vibrações eletromecânicas e o sistema de ventilação são os que mais contribuem para o ruído.

Na maioria dos casos, o ruído do sistema de ventilação é mascarado pelo ruído gerado pela vibração eletromecânica do transformador, que se origina no núcleo ferromagnético. Essa vibração ocorre pelo fato do núcleo ser formado por um conjunto de chapas justapostas, que por serem excitadas por forças de magnetostricção e por forças de atração e repulsão magnéticas, acabam sendo responsáveis pelos sons. Feito isso, a vibração do núcleo é transmitida ao resto da carcaça e sistemas auxiliares a ela fixados (caixas de comando/fusíveis, trocadores de calor e suportes variados). A Figura 4.2 apresenta um típico espectro de ruído em transformador.



**Figura 4.2 - Espectro de ruído do transformador**  
**Fonte: Adaptado de Ocón (2011).**

Portanto existem basicamente três fontes de produção de ruído em transformador de potência:

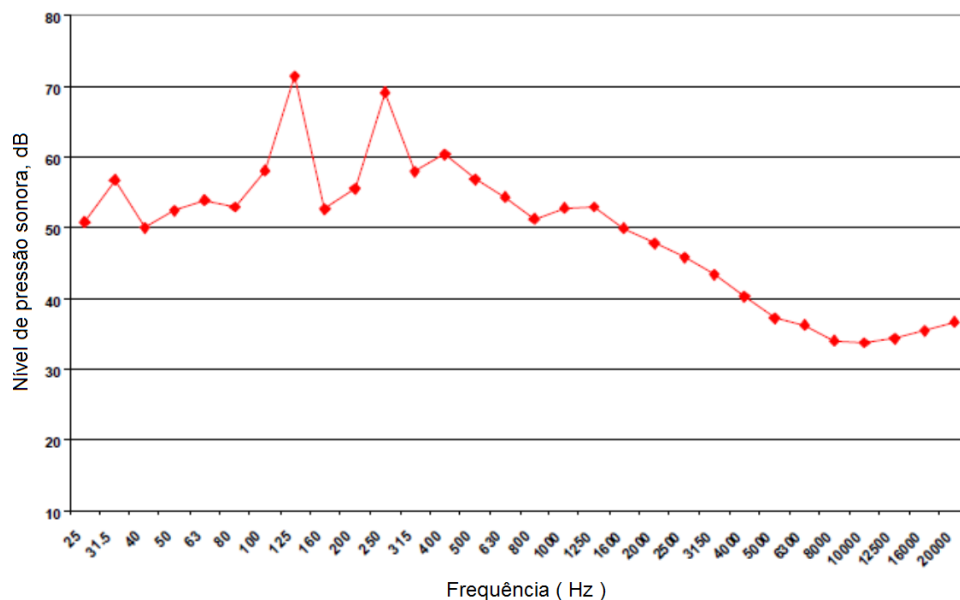
- Ruído no núcleo do transformador;
- Ruído causado por forças eletromagnéticas;
- Ruído de ventiladores e bombas.



#### 4.4.1 Ruído do Núcleo do Transformador

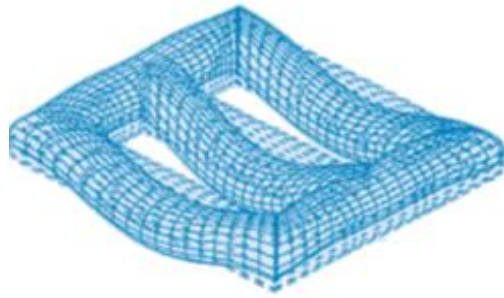
Quando as lâminas do núcleo são magnetizadas, estas sofrem pequenas mudanças nas suas dimensões. Este fenômeno é chamado de magnetostricção e ocorre quando um corpo metálico é colocado em um campo magnético. Os dipolos magnéticos do metal se orientam buscando o alinhamento com o campo magnético externo, resultando em expansão (geralmente de apenas alguns micrometros) do material. Apesar de haver histerese, 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. Então, para um transformador em uso na rede elétrica brasileira, com frequência de 60Hz, a vibração e, conseqüentemente, o ruído terá frequência fundamental de 120Hz (MASIERO, 2007).

Na Figura 4.3 é observado o espectro de ruído medido no núcleo do transformador, e pode ser observado que o pico do ruído ocorre na frequência de 120Hz.



**Figura 4.3 - Nível de ruído medido no núcleo do transformador**  
**Fonte: Adaptado de Ocón (2011).**

Na Figura 4.4 é possível observar o comportamento do núcleo do transformador em ressonância.



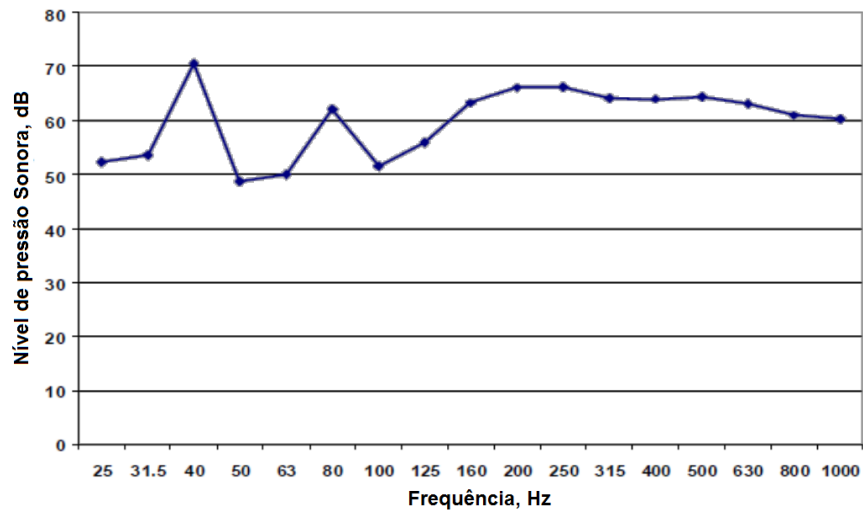
**Figura 4.4 - Ressonância no núcleo do transformador**  
**Fonte: Adaptado de Ocón (2011).**

#### 4.4.2 Ruído Causado por Forças Eletromagnéticas

A fonte destes ruídos são as vibrações das paredes do tanque, os protetores magnéticos, e os próprios enrolamentos. São predominantemente produzidas por vibrações axiais e radiais nos enrolamentos do transformador. Em alguns casos, a frequência natural dos enrolamentos pode ser próxima da frequência de excitação das forças eletromagnéticas, desse modo, intensifica-se severamente a amplitude de vibração e conseqüentemente de ruído acústico.

#### 4.4.3 Ruído de Ventiladores e Bombas

O ruído do sistema de ventilação, geralmente é encoberto pelo ruído gerado pela vibração eletromecânica do transformador. Os ventiladores empregados 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. O ruído gerado pelas bombas normalmente é imperceptível se o ventilador estiver em funcionamento, porém, ruídos em baixas frequências podem ser gerados. A Figura 4.5 apresenta o nível de ruído provocado pelos ventiladores e equipamentos de refrigeração do transformador.



**Figura 4.5 - Nível de ruído dos equipamentos auxiliares de refrigeração**  
**Fonte: Adaptado de Ocón (2011).**

## 4.5 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÕES

### 4.5.1 Ensaios para Medições do Nível de Ruído

O ensaio de nível de ruído deve ser executado conforme estabelece a NBR7277/2013. Entre as exigências dessa norma, tem-se que o local de ensaio deve proporcionar um campo praticamente livre sobre o plano refletor utilizado para medições. Com isso, o local pode ser uma sala comum, desde que os objetos refletores sejam removidos de perto do equipamento de ensaio com exceção do plano refletor, ou uma sala de ensaios, que proporcione linhas de contorno não perturbadas por reflexões provenientes de outros objetos.

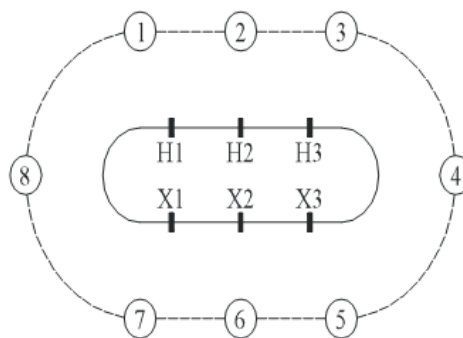
Outra condição da norma diz respeito às condições de medição. Nesse tópico a NBR7277/2013 estabelece que:

- Para medição do nível de ruído, o equipamento ensaiado deve estar com seus equipamentos auxiliares normais;
- O transformador deve ser excitado em vazio com tensão nominal, de forma senoidal e frequência nominal, com o comutador ligado na derivação principal;
- Os níveis de ruído do equipamento e do ambiente devem ser determinados como níveis de pressão acústica em dB;

- Quando o equipamento possuir sistema de resfriamento, os motores dos ventiladores e/ou bombas de óleo devem estar operando com tensão nominal, de forma senoidal e com frequência nominal.

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

A Figura 4.6 apresenta os pontos de medição realizados no ensaio, neste estudo as medições foram realizadas a 1 metro do transformador.



**Figura 4.6 - Ponto de medição**  
**Fonte: NBR 7277 (2013).**

#### 4.5.2 Condições de Operação do Equipamento Durante a Medição

Para fins das medições efetuadas no transformador com ou sem o equipamento de resfriamento, o transformador deve ser excitado em vazio com tensão nominal, de forma senoidal e frequência nominal, estando o comutador, se existir ligado na derivação principal. A tensão deve ser medida de acordo com a NBR7277/2013, observadas as prescrições referentes ao ensaio de corrente de excitação e perdas em vazio. Se o transformador for equipado com comutador de derivações em carga do tipo reator e se o reator em determinadas posições do comutador estiver permanentemente energizado, a medição deve ser feita com o transformador ligado numa derivação correspondente a esta condição e o mais

próximo possível da derivação principal. A excitação deve ser a correspondente à derivação usada.

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

## 5 SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES

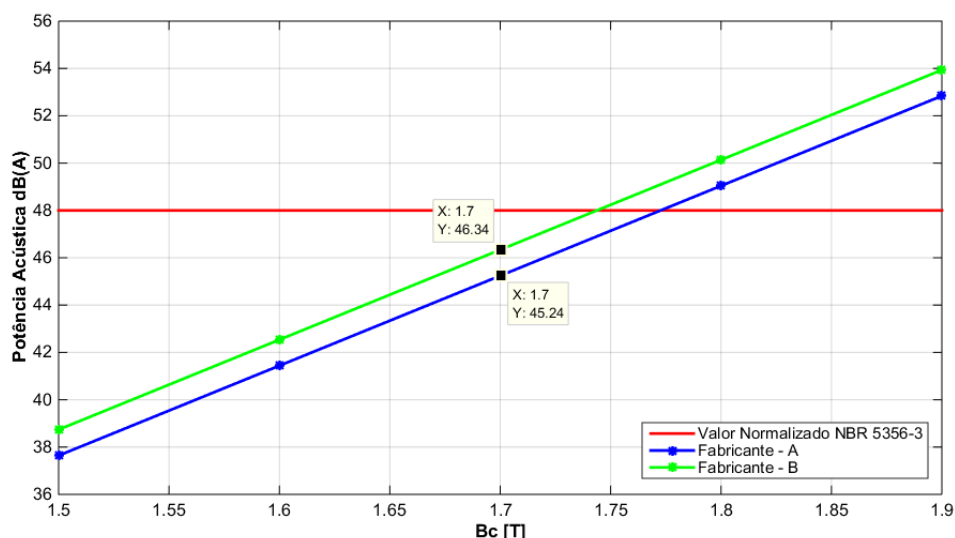
### 5.1 SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas em 6 classes de transformadores trifásicos de distribuição com potência de 15kVA, 30kVA, 45kVA, 75kVA, 112,5kVA e 150kVA, com classe de tensão de 15kV.

As simulações foram realizadas com a implementação de um algoritmo via MATLAB, 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 [m<sup>2</sup>], área da superfície de medição [m<sup>2</sup>], altura do tanque [m], comprimento da linha prescrita de contorno [m]. Sendo estes valores estes fornecidos por dois fabricantes, que serão tratados como Fabricante A e B.

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

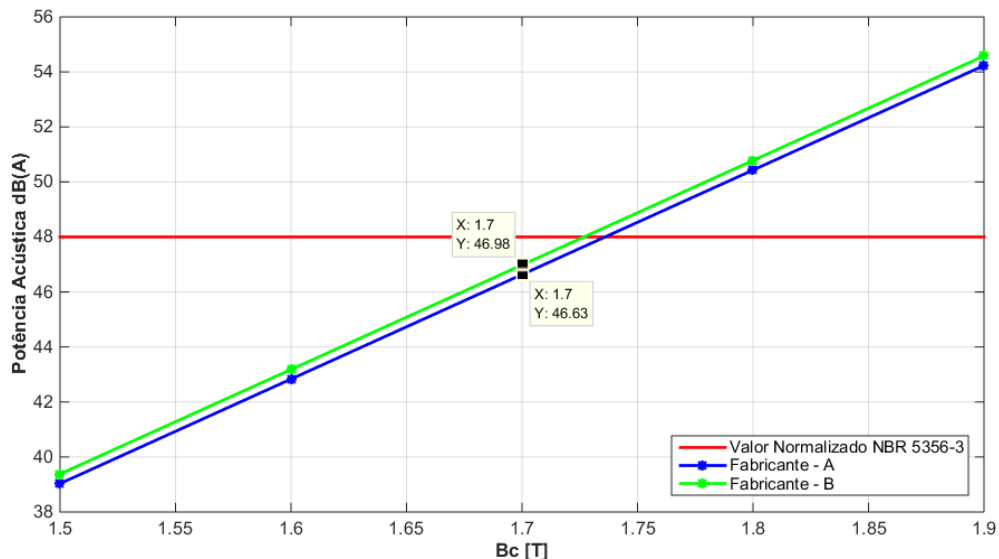
A Figura 5.1 apresenta a simulação realizada com o transformador de 15kVA, dos fabricantes A e B, utilizando seus aspectos construtivos e variando a indução magnética das chapas do núcleo do transformador. Estes dois fabricantes, utilizam chapa de aço silício de grão orientado com uma indução magnética de 1,7T, para todos os transformadores utilizados no estudo.



**Figura 5.1 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 15kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Figura 5.1 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 45,24dB(A) e o fabricante B 46,34dB(A), existindo uma diferença de 1,10dB(A) ou seja 2,29% entre os dois fabricantes. Com isso foi possível concluir que o fabricante A tem um nível de ruído menor para o transformador de 15kVA, mais ambos os fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 5356-3/2014. Vale salientar que a percepção auditiva das variações de intensidade sonora é aproximadamente igual a 1dB(A). Isto significa que será necessário uma diferença de 1dB(A) no nível do ruído para distinguir a intensidade sonora entre um som e outro.

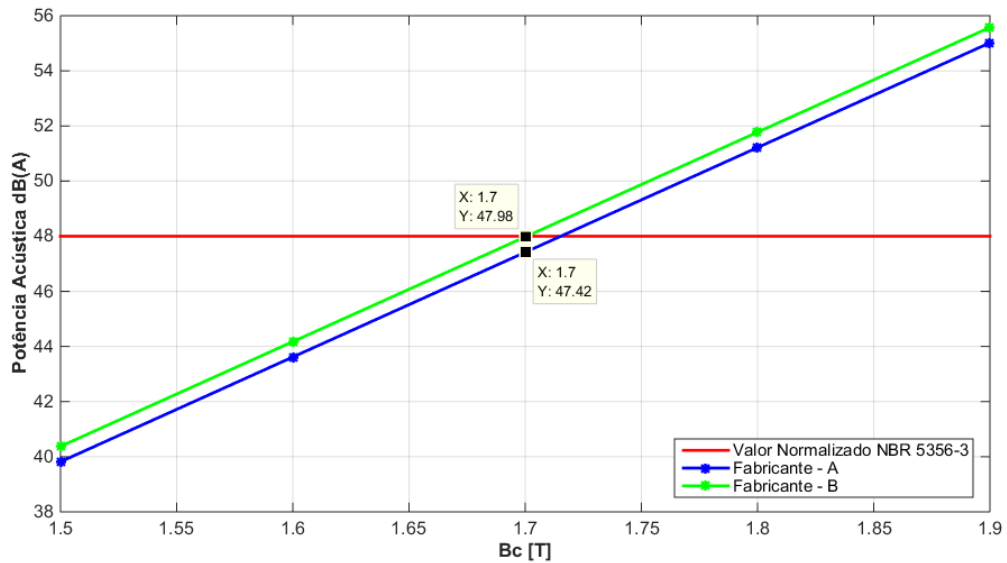
A Figura 5.2 apresenta a simulação realizada com o transformador de 30kVA, dos fabricantes A e B.



**Figura 5.2 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 30kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como observado na Figura 5.2 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 46,63dB(A) e o fabricante B 46,98dB(A), existindo uma diferença de 0,35 dB(A) ou seja 0,73% entre os dois fabricantes, sendo essa diferença imperceptível ao ouvido humano. Com isso é possível concluir que o fabricante A tem um nível de ruído inferior para o transformador de 30kVA, mais ambos fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 5356-3/2014.

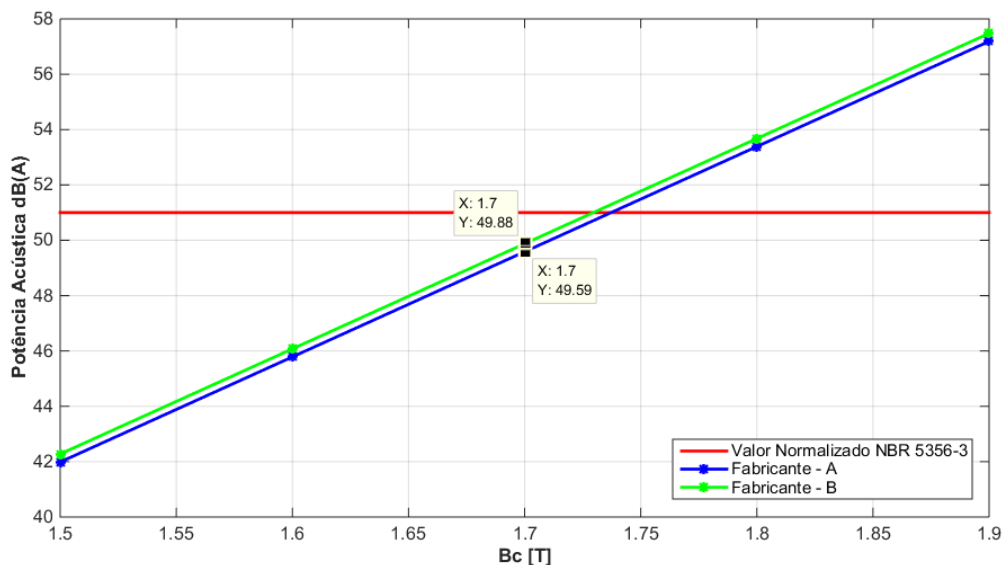
A Figura 5.3 apresenta a simulação realizada com o transformador de 45kVA, dos fabricantes A e B.



**Figura 5.3 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 45kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

E como pode ser observado na Figura 5.3 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 47,42dB(A) e o fabricante B 47,98dB(A), existindo uma diferença de 0,56dB(A) ou seja 1,17% entre os dois fabricantes, sendo uma diferença imperceptível ao ouvido humano. Com isso foi possível concluir que o fabricante A tem um nível de ruído menor para o transformador de 45kVA, mais ambos fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 5356-3/2014.

A Figura 5.4 apresenta uma simulação realizada com o transformador de 75kVA, dos fabricantes A e B.

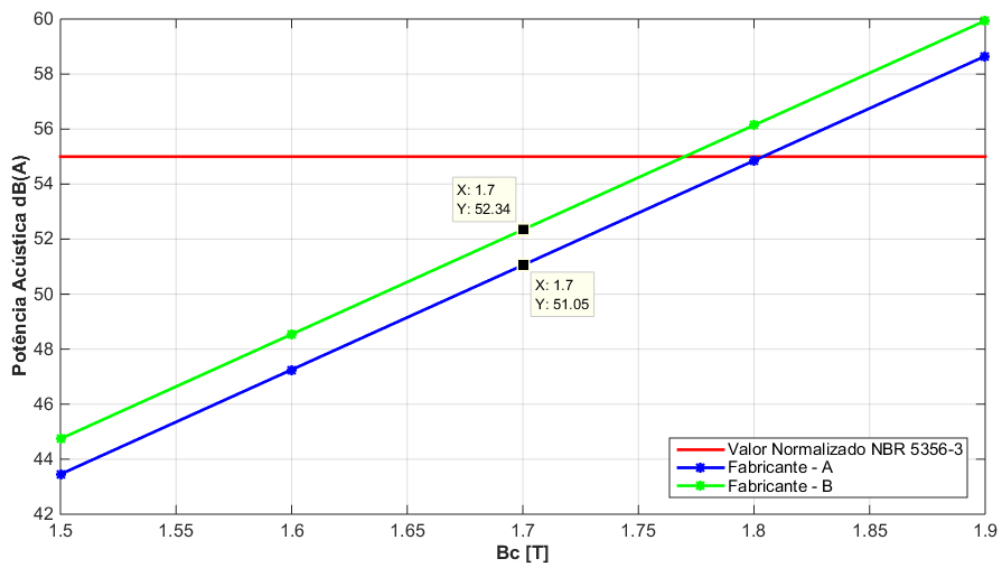


**Figura 5.4 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 75kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**



E como pode ser observado na Figura 5.4 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 49,59 dB(A) e o fabricante B 49,88 dB(A), existindo uma diferença de 0,29 dB(A) ou seja 0,57% entre os dois fabricantes. Com isso é possível concluir que o fabricante A tem um nível de ruído menor para o transformador de 75kVA, mais ambos fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 5356-3/2014.

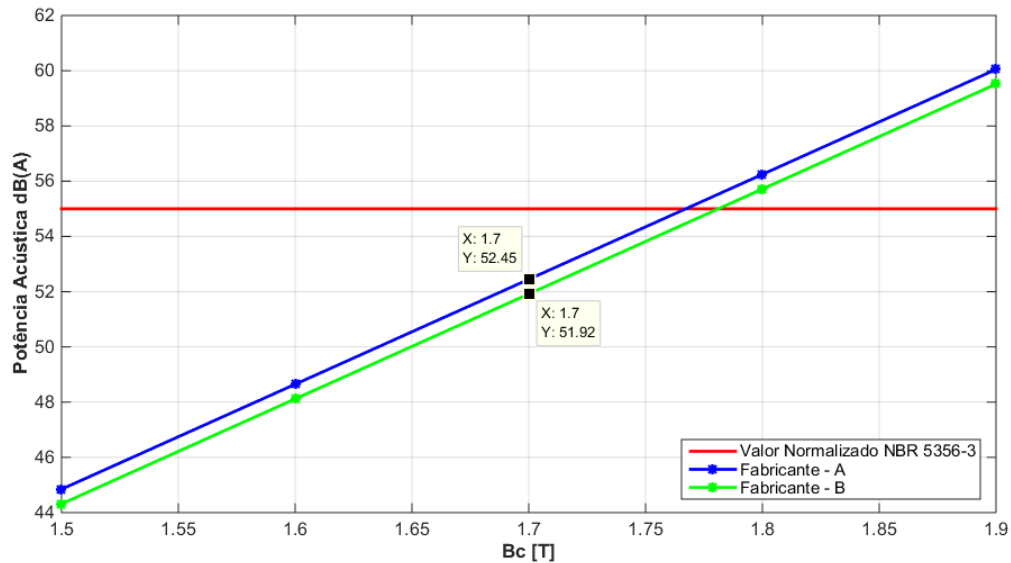
A Figura 5.5 apresenta uma simulação realizada com o transformador de 112,5kVA, dos fabricantes A e B



**Figura 5.5 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 112,5kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como apresentado na Figura 5.5 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 51,05dB(A) e o fabricante B 52,34dB(A), existindo uma diferença de 1,29dB(A) ou seja 2,35% entre os dois fabricantes, sendo essa diferença maior que 1dB(A), a qual a torna perceptível ao ouvido humano. Com isso foi possível concluir que o fabricante A tem um nível de ruído menor para o transformador de 112,5kVA. Sendo que os dois fabricantes apresentaram um nível de ruído abaixo do estipulado pela norma.

A Figura 5.6 apresenta a simulação realizada com o transformador de 150kVA, dos fabricantes A e B.



**Figura 5.6 - Nível de potência acústica emitida pelo transformador de 150kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

E como pode ser observado na Figura 5.6 o fabricante A apresentou um nível de ruído de 51,92dB(A) e o fabricante B 52,45dB(A), existindo uma diferença de 0,53dB(A) ou seja 0,96% entre os dois fabricantes. Com isso é possível concluir que o fabricante B tem um nível de ruído menor para o transformador de 150kVA, mais ambos fabricantes apresentaram um valor de ruído abaixo do exigido pela NBR 5356-3/2014.

## 5.2 MEDIÇÕES

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

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

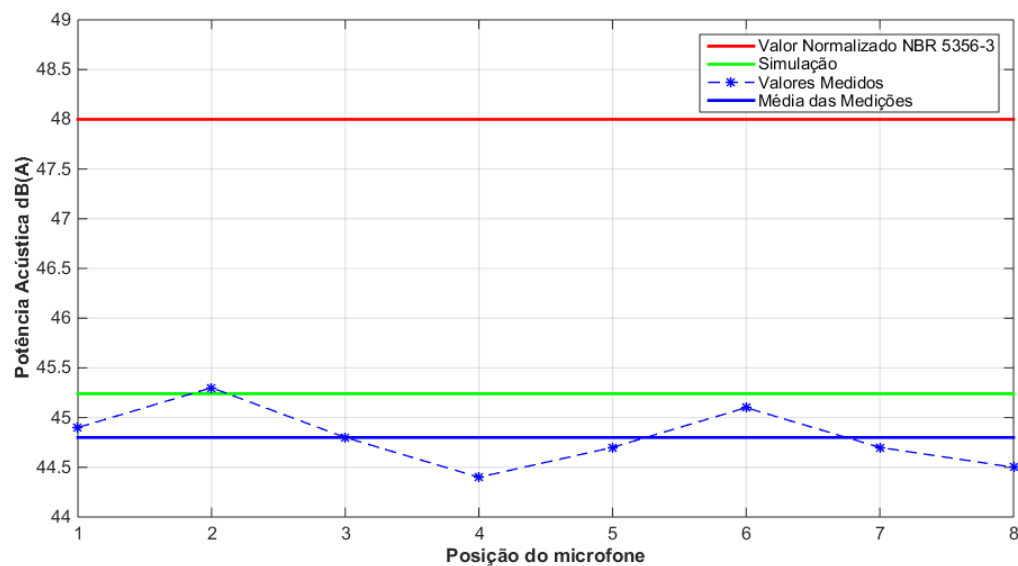
Para o transformador trifásico de 15kVA, foi construída a Tabela 5.1, a qual apresenta os valores medidos em cada uma das 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

**Tabela 5.1 - Valores de ruído medido para o transformador de 15kVA**

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	44,9
2	45,3
3	44,8
4	44,4
5	44,7
6	45,1
7	44,7
8	44,5
Media	44,8

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.7 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014.



**Figura 5.7 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 15kVA**

Fonte: Autoria própria.

Como apresentado na Figura 5.7 o valor simulado foi de 45,24dB(A) e o valor médio das medições 44,8dB(A) apresentando uma diferença de 0,44dB(A), sendo uma diferença de 0,92% entre o valor simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

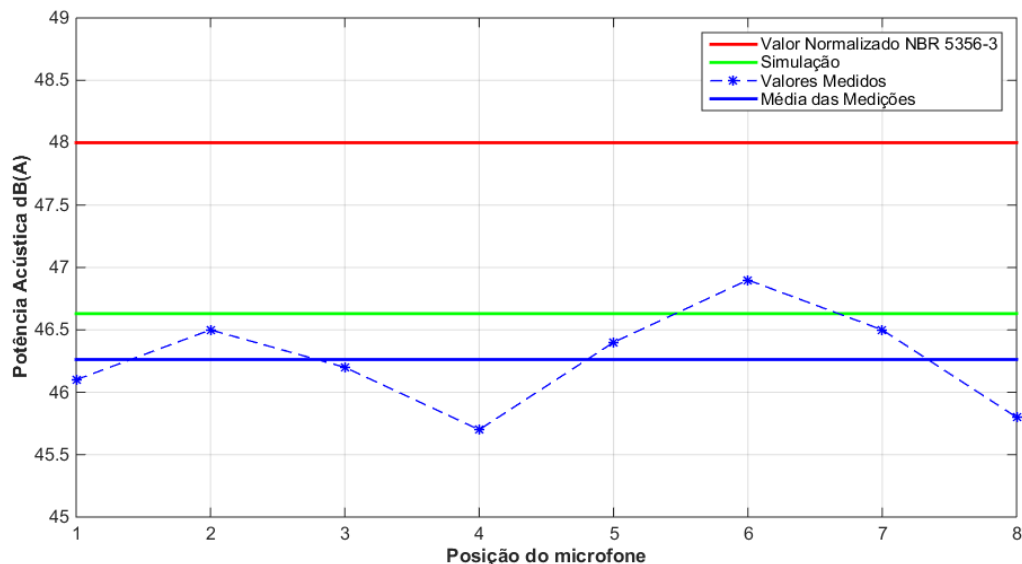
Para o transformador trifásico de 30kVA, foi construída Tabela 5.2, a qual apresenta os valores medidos em cada uma das 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

**Tabela 5.2 - Valores de ruído medido para o transformador de 30kVA**

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	46,1
2	46,5
3	46,2
4	45,7
5	46,4
6	46,9
7	46,5
8	45,8
Media	46,3

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.8 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014.



**Figura 5.8 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 30kVA**  
Fonte: Próprio autor.

Como apresentado na Figura 5.8 o valor simulado foi de 46,63dB(A) e o valor médio das medições 46,3dB(A) apresentando uma diferença de 0,33dB(A), sendo uma diferença de 0,69% entre o valor simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma

os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

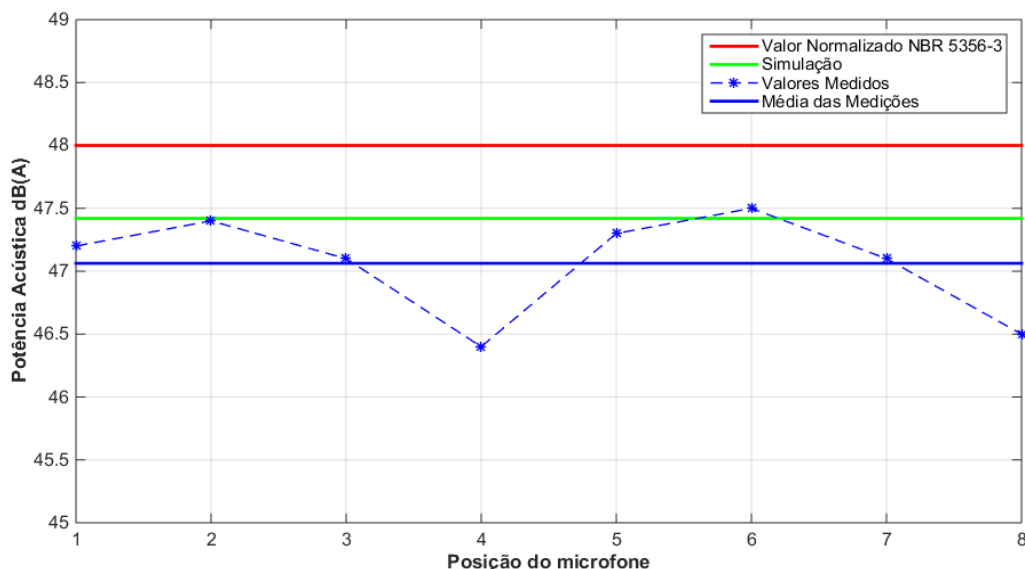
Para o transformador trifásico de 45kVA, foi construída a Tabela 5.3, a qual apresenta os valores medidos em cada uma das 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

**Tabela 5.3 - Valores de ruído medido para o transformador de 45kVA**

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	47,2
2	47,4
3	47,1
4	46,4
5	47,3
6	47,5
7	47,1
8	46,5
Media	47,1

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.9 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014.



**Figura 5.9 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 45kVA**  
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 5.9 o valor simulado foi de 47,42dB(A) e o valor médio das medições 47,1dB(A) apresentando uma diferença de 0,32dB(A), sendo uma diferença de 0,67% entre o simulado e o real. Com isso foi possível

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

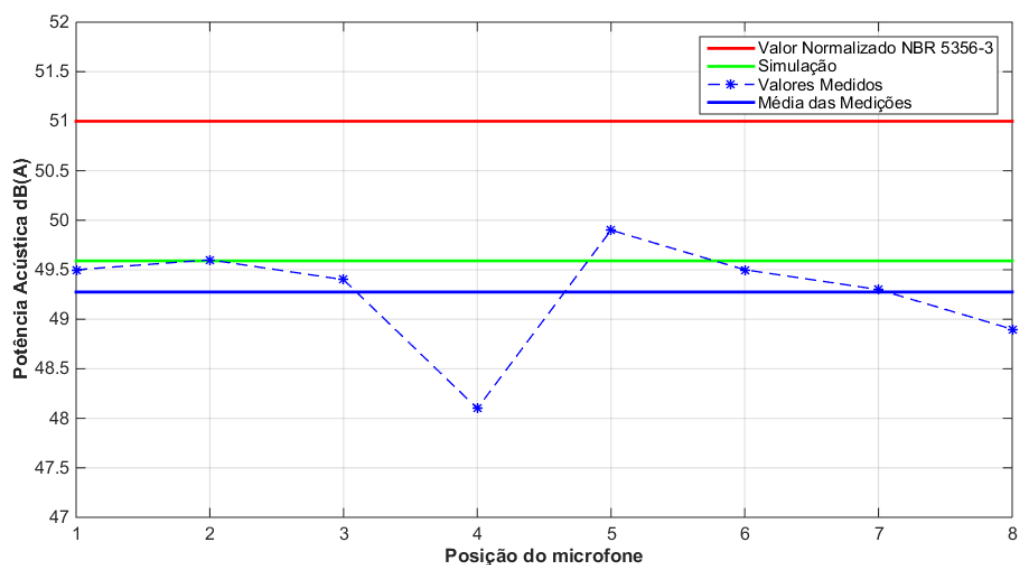
Para o transformador trifásico de 75kVA, foi realizada a construção da Tabela 5.4, a qual apresenta os valores medidos em cada uma das 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

**Tabela 5.4 - Valores de ruído medido para o transformador de 75kVA**

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

Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.10 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014.



**Figura 5.10 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 75kVA**  
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Figura 5.10 o valor simulado foi de 49,59dB(A) e o valor médio das medições 49,3dB(A) apresentando uma diferença de 0,29dB(A), sendo uma diferença de 0,57% entre o simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

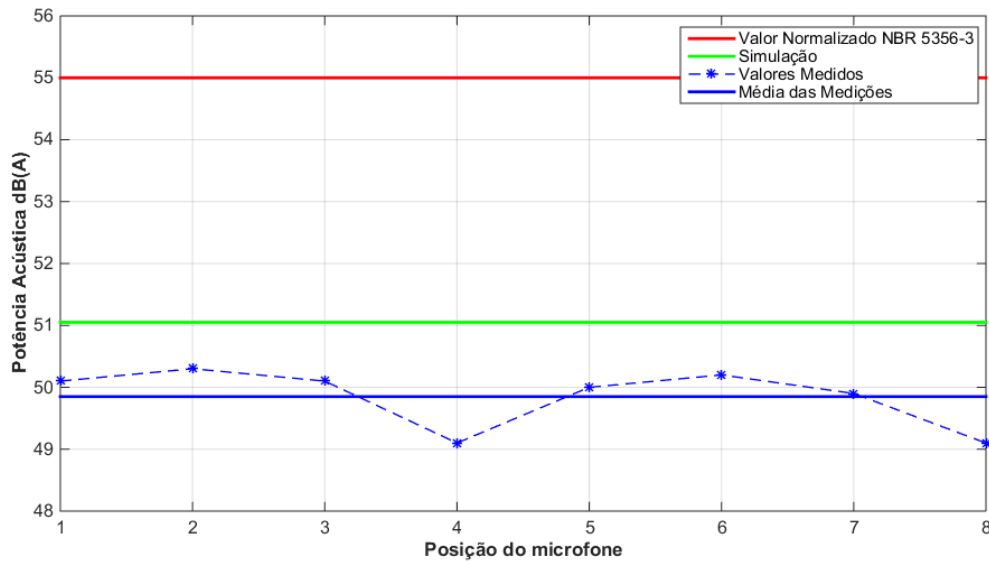
Para o transformador trifásico de 112,5kVA, foi construída a Tabela 5.5, a qual apresenta os valores medidos em cada uma das 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

**Tabela 5.5 - Valores de ruído medido para o transformador de 112,5kVA**

<b>Posição</b>	<b>Ambiente mais Transformador dB(A)</b>
1	50,1
2	50,3
3	50,1
4	49,1
5	50,0
6	50,2
7	49,9
8	49,1
Media	49,9

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 5 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014.



**Figura 5.11 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 112,5kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Figura 5.11 o valor simulado foi de 51,05dB(A) e o valor médio das medições 49,9dB(A) apresentando uma diferença de 1,15dB(A), sendo uma diferença de 2,09 % entre o simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

Para o transformador trifásico de 150kVA, foi construída a tabela 5.6, a qual apresenta os valores medidos em cada uma das 8 posições exigidas pela norma e também o cálculo do valor médio entre os pontos.

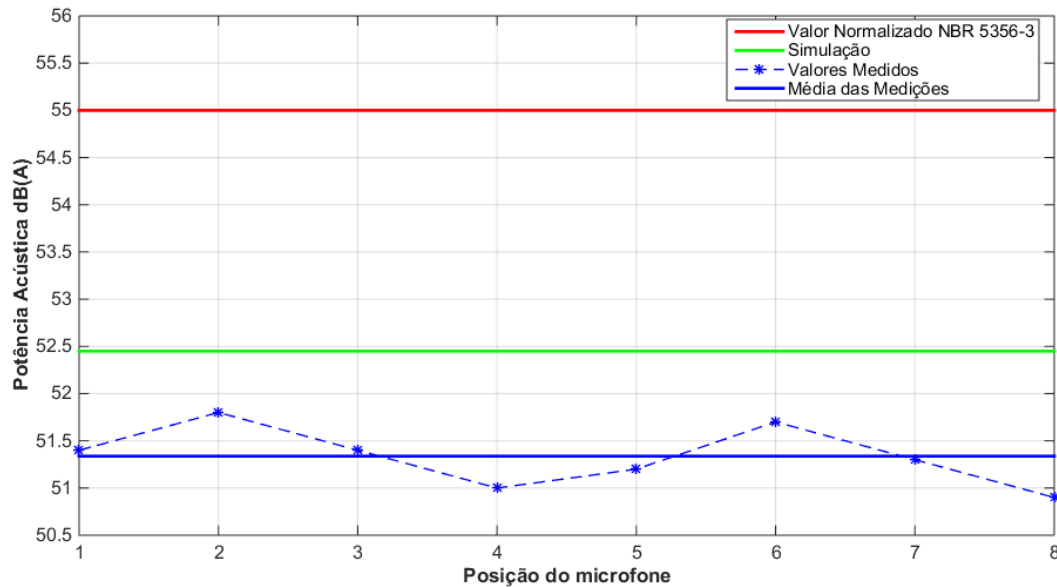
**Tabela 5.6 - Valores de ruído medido para o transformador de 150kVA**

Posição	Ambiente mais Transformador dB(A)
1	51,4
2	51,8
3	51,4
4	51,0
5	51,2
6	51,7
7	51,3
8	50,9
Media	51,3

**Fonte: Autoria própria.**



A Figura 5.12 apresenta os valores medidos em cada um dos 8 pontos do transformador, a média dos valores medidos, o valor encontrado pela simulação e o vigente pela NBR 5356-3/2014.



**Figura 5.12 - Ruído simulado, medido e normalizado, para o transformador de 150kVA**  
**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Figura 5.12 o valor simulado foi de 52,45 dB(A) e o valor médio das medições 51,3 dB(A) apresentando uma diferença de 1,15 dB(A), sendo uma diferença de 2,09 % entre o simulado e o real. Com isso foi possível concluir que os valores encontrados pelo algoritmo de simulação são coerentes com os valores reais, portanto o algoritmo atingiu um resultado satisfatório. Desta forma os valores de ruído reais e simulados estão de acordo com as exigências prescritas na NBR 5356-3/2014.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHO FUTUROS**

### **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

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

Foram apontadas as principais causas geradoras de ruído em transformadores de distribuição. Averiguou-se a importância do ensaio, bem como a realização da metodologia da medição de ruído em transformadores, que é um assunto pouco abordado na literatura.

O objetivo desta monografia foi associar o nível de ruído com a variação de indução da chapa do núcleo do transformador, sendo possível verificar através dos gráficos apresentados no capítulo 5, que quanto maior a indução da chapa utilizada na construção do núcleo maior será o ruído apresentado no mesmo.

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

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

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

### **6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS**

Com a realização deste trabalho foi possível sugerir algumas das principais medidas que podem ser adotadas para reduzir o ruído de origem eletromagnéticas, e suas conseqüentes vibrações mecânicas, as quais estão descritas a seguir.

Amarração das colunas do núcleo, consiste em aplicar as técnicas de enfaixamento com bandagens de algodão, ou qualquer outro material sintético isolante, pouco elástico, durável e resistente as condições de trabalho do equipamento (temperatura e contato com óleo ou fluídos sintéticos), atribuindo maior rigidez possível ao processo e reduzindo as vibrações mecânicas das lâminas que constituem a coluna.

Enrolamentos com bobinas tipo toroidal e calços, a utilização de bobinas tipo toroidal intercaladas com calços de material isolante (papelão, madeira ou sintéticos) contribuem para a estabilização do enrolamento sujeito a vibrações mecânicas. Se os calços tiverem propriedades amortecedoras os efeitos serão melhores. Esta técnica traz como grande desvantagem o aumento de volume do enrolamento. Em compensação, além da redução dos ruídos, melhora os aspectos de refrigeração (maior superfície de contato do fluído com o enrolamento) e propicia substituições parciais dos enrolamentos no caso de danos.

Uso de condutores retangulares nos enrolamentos, procedimento amplamente adotado com a finalidade de economizar volume de enrolamento (quando comparado com o volume perdido no uso de espiras com seção circular), consiste numa excelente técnica para melhorar o assentamento das espiras e, por consequência, a susceptibilidade aos movimentos mecânicos decorrentes das vibrações.

### 6.3 PUBLICAÇÕES

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

FINOCCHIO, Marco A. F.; MENDONÇA, Marcio; FERREIRA, Jeferson G.; BARBOSA, Thales M. **Óleos Vegetais como Substituto para Óleos Minerais Isolantes**. Revista Científica do Instituto Federal São Paulo – Sinergia – Volume 17, Edição 2, 2016. Aceito para publicação, 2016.

## REFERÊNCIAS

- 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 10151: **Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade**. Rio de Janeiro, 2000.
- AZEVEDO, Fernando J. de; MOURA, Dêdison S. **Apostila: Máquinas e Instalações Elétricas I**. EEEMBA – Escola Técnica Eletro-Mecânica da Bahia: Publicação: Interna EEEMBA, 2012.
- BICZKOWSKI, Maurício. **Transformador à óleo e transformador à seco**. CESCAGE - Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais, Ponta Grossa, 2011.
- 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, Jorge L. **Proposes for reduction and attenuation of noises coming from electrical high-power transformers and substations**. PROMEC-UFRGS, 2006.
- 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, Samir N. Y. **Ruído, Fundamentos e Controle**. 2ª ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GLOBALTECH. Centro Técnico Profissionalizante. **Materiais e Equipamentos em Sistema de Baixa Tensão. 2015.**

HASSEL, J. R; ZAVERI, K. **Acoustic Noise Measurements.** 5ª ed. Naerum, Denmark: Brüel & Kjaer, 1998.

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

LEOPOLDINO, Reginaldo. **Estudo sobre gases dissolvidos em óleos vegetais isolantes – influência de arco elétrico e superaquecimento.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

MARIANO, Carlos H. **Apostila: Transformadores,** Curitiba: Publicação Interna UTFPR, 2001.

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

NASAR, Syed A. **Electric Machines & Electromechanic,** 2ª ed ed. Nova York: McGraw-Hill, 1998.

NEVES, Eurico G. C.; MUNCHOW, Rubi. **Transformadores Elétricos.** Universidade Federal de Pelotas, 2011.

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

OLIVEIRA, António A. L. **Utilização de Óleos Biodegradáveis em Transformadores de Distribuição.** Monografia (Graduação) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2005.

REV, Marcos L. **Apostila: Óleo isolante.** Santa Catarina: Publicação Interna SENAI-SC, 2005.

RODRIGUES, V. F.; MEDEIROS, E. B.; PAVANELLO, L. **Mapeamento preliminar de emissão acústica em uma subestação elétrica urbana.** Anais do I Congresso Ibero-americano de Acústica, 1998.

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

SCHULTZ, Theodore J. **Community Noise Rating.** London: Applied Science Publishers 2.ed., 1982.

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

SHENGCHANG, JI; YANMING, Li; CHENG, Jin. **Research on Vibration Characteristics of Windings and Core of Oil-Filled Transformer**. Journal of Xi'an Jiaotong University, Vol.39, 2005.

SIGMA, Transformadores. **O Transformador**. Lagoa Vermelha: Sigma, 2012. 6p.

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