

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
ENGENHARIA ELÉTRICA

TAISE NAEMI TANAKA

ESTUDO DE RUÍDO EM MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

TAISE NAEMI TANAKA

ESTUDO DE RUÍDO EM MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Taise Naemi Tanaka

ESTUDO DE RUÍDO EM MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:50hs do dia 26/11/2018 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). João Cesar de Paula Salve - (Membro)

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

Dedico carinhosamente esse trabalho à minha família:

Tiemi Neusa Tanaka

Luiz Haruo Tanaka (in memoriam)

Elise Yumi Tanaka

Laise Harumi Tanaka

RESUMO

TANAKA, Taise Naemi. Estudo De Ruído Em Motores De Indução Monofásico. 2018. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

O estudo do ruído em motores na indústria hoje é amplamente praticado devido à maior atenção em relação à saúde dos operadores e do ambiente de trabalho, além do impacto no rendimento do motor, porém, nem todas as vezes é colocado em prática. O meio de controlar o ruído de maneira mais eficiente inicia-se no projeto do motor, atentando-se às prováveis fontes de ruído e amezinando-as antes mesmo da fabricação do equipamento. Existem rigorosas normas que regulam os níveis sonoros permitidos em várias configurações e faixas de potência dos motores, sendo possível realizar ensaios de medição e averiguar se o motor está dentro dos limites aceitáveis de ruído.

Palavras-chave: Motor de indução monofásico. Ruído em motores de indução. Medição de ruído.

ABSTRACT

TANAKA, Taise Naemi. Study of Noise in Single Phase Induction Motors. 2018. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The study of motor noise in the industry is widely practiced due to the increased attention paid to operators' health and workability, as well as the impact on the motor performance. The most effective way to control noise is to start during the motor design by predicting sources of noise and soften them even before the equipment is manufactured. There are stringent standards that regulate sound levels allowed in various motor power settings and ranges, so it is possible to conduct measurement tests and ascertain that the motor is within acceptable noise limits.

Keywords: Single-phase induction motor. Noise in induction motors. Measurement of noise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Onda longitudinal através da compressão de uma mola	12
Figura 2 - Onda transversal através do movimento de uma corda	13
Figura 3 - Relação entre frequência e comprimento de onda.....	14
Figura 4 - Limites da audição humana	18
Figura 5 - Curvas de ponderação A, B, C e D	19
Figura 6 - Tipos de motores de corrente contínua e alternada.....	20
Figura 7 - Vista explodida de um motor de indução de rotor laminado.....	21
Figura 8 - Enrolamento de um motor monofásico	22
Figura 9 - Circuito elétrico do MIM com fase dividida.....	22
Figura 10 - Circuito elétrico do MIM com capacitor de partida	23
Figura 11 - Circuito elétrico do MIM com capacitor permanente	24
Figura 12 - Motor de pólos sombreados.....	24
Figura 13 - Mapeamento das fontes de ruído.....	28
Figura 14 - Ilustração do conceito de caixa de referência e superfície de medição para ensaios de ruídos em máquinas elétricas	29
Figura 15 - Dados da plaqueta do motor em análise.....	35
Figura 16 - Medição no eixo Z.....	36
Figura 17 - Medição no eixo Y.....	36
Figura 18 - Gráfico gerado a partir da medição do ruído no eixo X.....	37
Figura 19 - Gráfico gerado a partir da medição do ruído no eixo Y	37
Figura 20 - Gráfico gerado a partir da medição do ruído no eixo Z	38
Figura 21 - Histograma gerado a partir da medição do ruído no eixo X	39
Figura 22 - Histograma gerado a partir da medição do ruído no eixo Y	39
Figura 23 - Histograma gerado a partir da medição do ruído no eixo Z	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVOS	11
1.2. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	11
1.3. ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. TIPOS DE ONDA	12
2.1.1. Ondas longitudinais	12
2.1.2. Ondas transversais	13
2.1.3. Ondas mistas	13
2.2. FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA	13
2.3. ONDAS SONORAS	14
2.3.1. Velocidade do som no fluido	15
2.3.2. Intensidade e nível sonoro	16
2.3.3. Curvas de ponderação - escalas dos medidores sonoros	18
2.4. MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO (MIM)	19
2.4.1. “ <i>Split phase</i> ” (fase dividida)	22
2.4.2. Capacitor de partida	23
2.4.3. Capacitor permanente	23
2.4.4. “ <i>Shaded poles</i> ” (pólos sombreados)	24
2.4.5. Escorregamento do motor	25
2.4.6. Frequência elétrica do rotor	25
2.4.7. Principais vantagens dos motores de indução monofásicos	26
2.4.8. Principais fontes de ruído em motores de indução	26
3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE RUÍDO	29
3.1. ANÁLISE DE FOURIER – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	30
4. MEDIÇÃO E RESULTADOS	33
5. CONCLUSÃO	41
5.1. TRABALHOS FUTUROS	42

1. INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial segundo ÁVILA (2008), houve o grande crescimento da utilização das máquinas para produção em grande escala, porém nesta época não havia a preocupação por parte das empresas e/ou empregadores quanto aos níveis de ruído em que os seus funcionários estavam expostos. Longos períodos de exposição à ruídos contínuos levam à sérios problemas de saúde, como enxaqueca, perda de audição, dificuldade de concentração, até problemas na estrutura óssea do trabalhador devido as vibrações que as ondas sonoras produzem, além de outras consequências muitas vezes irreversíveis.

Através do avanço tecnológico foi possível o desenvolvendo de máquinas e equipamentos cada vez mais eficientes e silenciosos (BOYCE E DIPRIMA, 2001); e a partir da implementação dos direitos dos trabalhadores houve uma crescente preocupação quanto às condições de trabalho dos funcionários devido há inúmeros casos de invalidez ou perda parcial de capacidade auditiva causados exposição à ambientes nocivos que geravam grande dor de cabeça tanto para o funcionário, quanto para a empresa/empregador quanto aos seus deveres.

É de extrema importância e muito comum, segundo CHAPMAN (2013) o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) para minimizar os efeitos dos ruídos durante a jornada de trabalho, porém esses equipamentos não devem ser adotados como medidas únicas para a proteção, inicialmente é necessário o controle e redução do ruído na fonte emissora. Os EPI's podem e devem ser utilizados, porém caso não seja possível o controle do ruído na fonte emissora, eles devem ser empregados em conjunto com medidas de proteção coletivas tais como enclausuramento acústico, atenuadores de som, portas e janelas com proteção acústica que permitem a isolação do ruído.

Através de todo o histórico acerca do ruído sonoro e da sua interferência da qualidade de trabalho e de vida dos funcionários, se faz necessário o estudo mais detalhado das fontes de ruído nos equipamentos hoje empregados nas indústrias, empresas de todos os portes e qualquer outra situação. Grande

trabalho foi aplicado visando relacionar quais os limites máximos adequados de ruído e o tempo de exposição que um funcionário pode estar exposto durante a sua jornada de trabalho diária. Com isso, foram criadas normativas que regulamentam esses níveis de ruído máximos, entre outras normas relativas ao tempo de exposição máximo do operador ao ruído, que foram adotados por muitos fabricantes de máquinas elétricas especificamente, que serão o nosso foco de estudo neste trabalho.

De acordo com CUNHA (2006), existem dois tipos de motores elétricos, os motores de corrente contínua, denominados motores CC e os de corrente alternada, chamados de motores CA. No grupo dos motores CA, temos ainda a distinção entre motores síncronos onde a velocidade é proporcional à frequência da tensão de alimentação, e os motores assíncronos onde a velocidade não necessariamente varia linearmente de acordo com a frequência de entrada.

Os motores de indução são comumente utilizados em aparelhos domésticos como lavadoras de roupas, centrífugas, exaustores, furadeiras, liquidificadores, pois esse tipo de motor apresenta um baixo custo e poucas manutenções, baixo ruído e robustez.

As três principais fontes são a ventilação, mecânica e magnética. O ruído total de um motor é a soma dessas três categorias de ruídos, divididos para a avaliação de cada fonte isoladamente.

A principal fonte de ruído magnético é devido ao seu dimensionamento de comprimento de entreferro. Este é o motivo pelo qual o motor de indução sofre expressiva influência de campos magnéticos harmônicos, causados pelas ranhuras espaçadas que são responsáveis pela geração das maiores amplitudes do ruído magnético dos motores (EGGERT et al, 2007)

Este trabalho de conclusão de curso visa o estudo de um método de medição de ruído em motores de indução monofásicos, apresentando suas características construtivas, fontes de ruídos, método de medição e validação das medições com o nível de ruído máximo tolerável para o motor em estudo.

1.1. OBJETIVOS

O principal objetivo do desenvolvimento deste trabalho é realizar o estudo do ruído sonoro em um motor de indução monofásico.

1.2. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A maior motivação para esse estudo de causa e efeito do ruído em máquinas síncronas, visto que se trata de um assunto muito importante, mas que não recebe tanta atenção quanto deveria, agravando a situação do operador que se encontra exposto ao ruído durante a jornada de trabalho e também que podem ser fontes de perdas no rendimento da máquina.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

- Capítulo 1: apresenta uma breve introdução, acompanhada pelos objetivos e justificativa;
- Capítulo 2: fundamentação teórica do motor assíncrono monofásico com suas vantagens e desvantagens;
- Capítulo 3: é abordada a técnica de medição de ruído em motores sua metodologia, e a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT), modelo de medição proposto através do Matlab;
- Capítulo 4: trata se da apresentação das medições e os resultados obtidos através do estudo;
- Capítulo 5: Faz se as considerações finais referentes a este trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. TIPOS DE ONDA

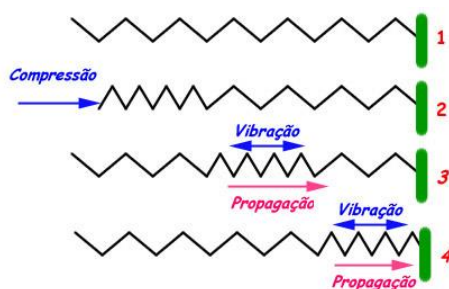
Existem três tipos principais de ondas: ondas de matéria, eletromagnéticas e mecânicas. As ondas de matéria são as que menos tem-se compreensão, pois estão ligadas a partículas elementares como os elétrons e os neutrons (HALLIDAY, 2016). As ondas eletromagnéticas são as mais utilizadas no nosso dia a dia, não necessitam de meio material para se propagarem como a luz visível, raios x, micro-ondas, ondas de rádio, entre outros exemplos.

As ondas mecânicas são aquelas que ao contrário das ondas eletromagnéticas, necessitam de um meio físico para se propagarem e são as mais conhecidas, pois é possível observá-las com maior facilidade, sendo alguns exemplos mais banais as ondas do mar e as ondas sonoras. Como este projeto tem como foco principal o estudo do ruído sonoro em um motor monofásico, adiante será dado maior enfoque ao estudo das ondas mecânicas.

2.1.1. Ondas longitudinais

São as ondas em que a propagação e vibração ocorrem na mesma direção. Um exemplo bem simples de ondas longitudinais é de uma mola, demonstrada na Figura 1, que sofre compressão em uma de suas extremidades, essa ação desencadeia um pulso de vibração que tem a mesma direção da sua trajetória de propagação.

Figura 1 - Onda longitudinal através da compressão de uma mola



Fonte: Autoria própria

2.1.2. Ondas transversais

Nesse tipo de onda, as oscilações ocorrem na direção ortogonal, ou seja, forma um ângulo de 90° , em relação à direção em que se propaga. Tomando como exemplo a oscilação em uma corda para cima e para baixo por conta da passagem de uma onda, onde o deslocamento dos elementos da corda são perpendiculares à direção da propagação da onda e que pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Onda transversal através do movimento de uma corda



Fonte: Autoria própria

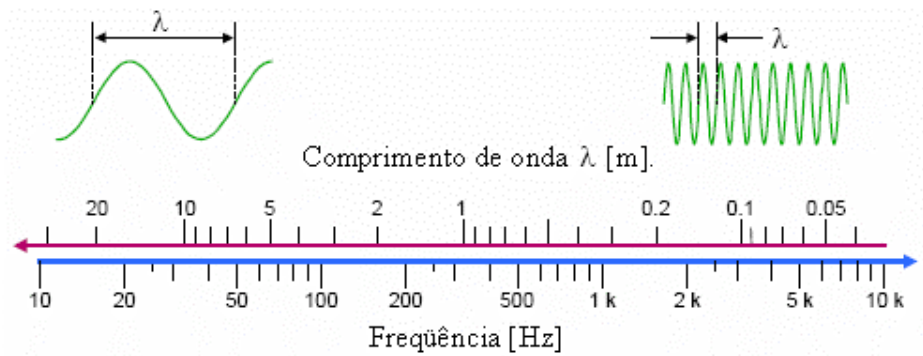
2.1.3. Ondas mistas

Existe o caso onde as ondas não são exclusivamente longitudinais ou transversais, essas duas características podem ocorrer simultaneamente e normalmente são ondas propagadas em meios líquidos.

2.2. FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DE ONDA

O comprimento de uma onda (λ) é a distância entre duas cristas, pontos de maior distância positiva do eixo, ou entre dois vales, pontos de maior distância negativa do eixo. Na Figura 3 é possível observar exatamente essa característica da crista.

Figura 3 - Relação entre frequência e comprimento de onda



Fonte: rc.unesp.br

O período T de uma onda é dado pelo intervalo de tempo de uma vibração completa. A frequência f da onda medida em Hertz, é a quantidade de oscilações por unidade de tempo produzida pela fonte emissora, ela pode ser calculada através das Equações (1) e (2) abaixo, onde a variável ω é chamada de frequência angular da onda e é medida em radianos por segundo e pode ser calculada pela Equação (2).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

2.3. ONDAS SONORAS

Segundo GERGES (2000), a colisão sucessiva de moléculas em um meio é a forma com que o som se propaga e é bem representada por séries de rarefações e compressões no meio de propagação, lembrando que há apenas a transferência de energia e não de matéria.

2.3.1. Velocidade do som no fluido

Como já comentado anteriormente, a onda sonora é uma onda mecânica que necessita de um meio para se propagar. Pode-se aproximar uma fórmula para calcular a velocidade do som " c " no ar, em metros por segundo, essa Equação (3) leva em conta a temperatura t , medida em °C:

$$c = 331 + 0,6t \quad (03)$$

Para medir a velocidade do som em vários meios, utilizamos a Equação (4) que leva em consideração o módulo de elasticidade volumétrica " B " em Pascal e a massa específica " ρ " dada em Kg/m³:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (04)$$

Abaixo na Tabela 1, exemplifica-se a velocidade do som em vários meios, levando-se em consideração a temperatura do meio em 0 °C e a pressão atmosférica de 1 atm. Note que no ar, há uma pequena variação de aproximadamente 10 m/s enquanto a mesma variação de temperatura na água aumenta a velocidade do som em 80 m/s.

Tabela 1 - Velocidade do som considerando 0°C e 1 atm

Meio	Velocidade (m/s)
Ar (0 °C)	331
Ar (20 °C)	343
Hélio	965
Água (0 °C)	1402
Água (20 °C)	1482
Aço	5941
Alumínio	6420
Granito	6000

Fonte: Halliday, 2016.

2.3.2. Intensidade e nível sonoro

Entende-se como intensidade sonora " I ", o fluxo de energia por unidade de área em que o som é transmitido. De uma maneira bem simples, podemos calcular essa intensidade através da Equação (5) sabendo o valor da potência sonora " P " em watts e a área da superfície " A " dada em m^2 em que o som é captado, a medida da intensidade é dada em W/m^2 .

$$I = \frac{P}{A} \quad (5)$$

Quanto maior a distância da fonte emissora, a intensidade sonora tende a diminuir, sendo assim, tem-se que a intensidade depende da distância entre a fonte emissora e a superfície. Para uma fonte sonora circular, pode-se calcular essas diferentes intensidades através da Equação (6), onde o " r " seria o raio da fonte emissora.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (6)$$

O nível de intensidade sonora " NI " é medido em decibéis dB devido ao grande range de pressão sonora que o ouvido humano é capaz de detectar. Para calcular este valor utilizando a Equação (7) faz-se necessário o uso do valor de intensidade de referência mínimo da faixa de audição que um ser humano consegue escutar que é $I_0 = 10^{-12} W/m^2$.

$$NI = (10 \text{ dB}) \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (7)$$

A Tabela 2 apresenta alguns níveis sonoros estimados de atividades que fazem parte do nosso cotidiano como os sons do meio ambiente, uma conversa em tom normal, e uma atividade não tão corriqueira assim como o nível sonoro de um show musical e de turbina de avião.

Tabela 2 - Exemplos de níveis sonoros (dB)

Limiar da audição	0
Farfalhar das folhas	10
Conversa	60
Show de rock	110
Limiar da dor	120
Turbina a jato	130

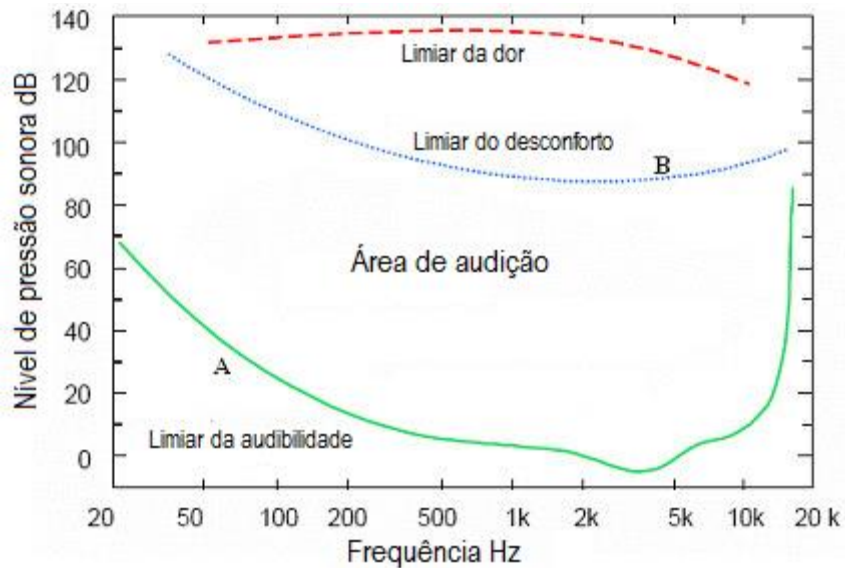
Fonte: Halliday, 2016.

Em termos de potência, temos que o nível de potência sonora “ NWS ” que é medida em dB que é definida pela Equação (8). Semelhante ao nível de intensidade sonora, “ W ” é a potência sonora da fonte emissora e o valor de $W_0 = 10^{-12} W/m^2$, sendo o valor de referência.

$$NWS = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (8)$$

2.3.3. Curvas de ponderação - escalas dos medidores sonoros

Figura 4 - Limites da audição humana

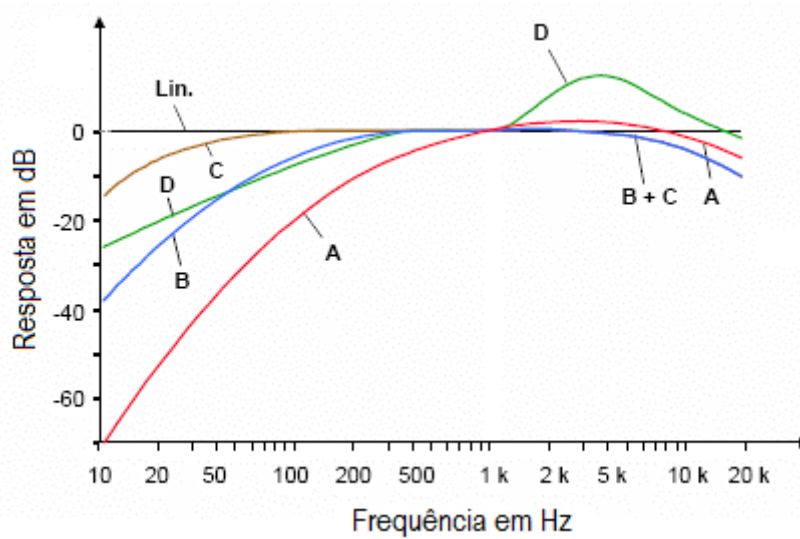


Fonte: Buel and Kjaer. Basic Concepts of Sound, 1998.

NAU (1988) afirma que a sensibilidade do ouvido humano não é igual para todas as frequências, com isso dois ruídos diferentes mas com o mesmo nível de pressão sonora podem ser percebidos de maneiras distintas. Caso a potência de um dos ruídos estivesse concentrado em uma frequência onde o ouvido humano é mais sensível, esse ruído seria notado de forma a fornecer a impressão de que é mais alto.

Através da constatação anterior, é possível chegar a conclusão de que o nível de pressão sonora não é uma medida de intensidade do som, e para realizar uma análise mais real são usadas as curvas de ponderação A, B, C e D que estão demonstradas na Figura 5. Essas curvas são filtros de frequência incorporados aos medidores de níveis de som e fornecem as correções dos níveis de pressão sonora necessários em cada frequência resultando em uma mesma audibilidade aparente que um ruído em 1000 Hz. Dentre essas quatro curvas, a mais utilizada é a escala A e quando tratamos da denotação da escala empregada, utiliza-se parênteses após do símbolo da unidade, por exemplo, dB (A).

Figura 5 - Curvas de ponderação A, B, C e D



Fonte: Buel and Kjaer. Basic Concepts of Sound, 1998.

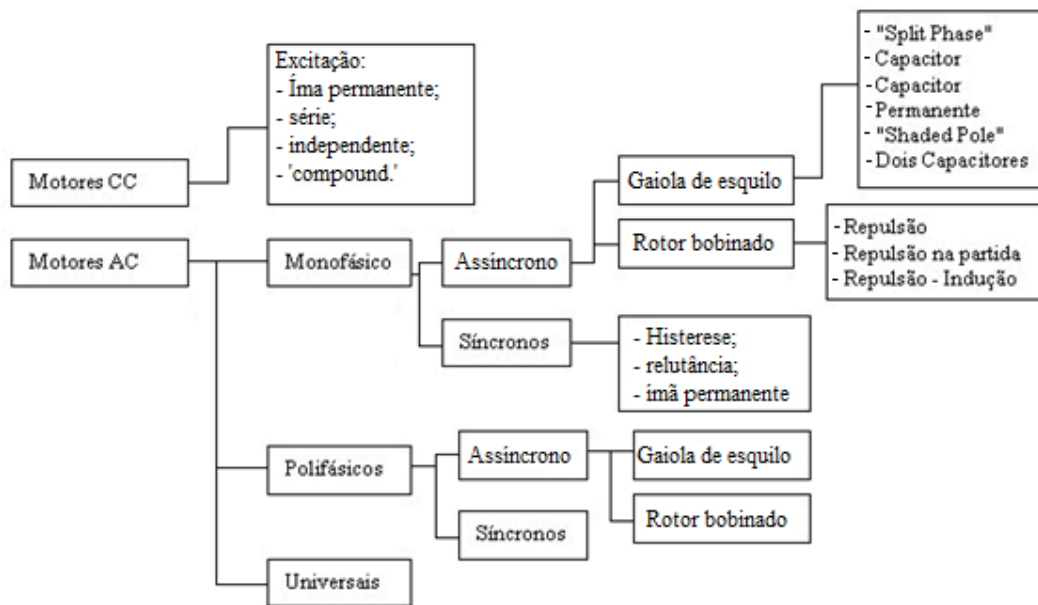
2.4. MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO (MIM)

O funcionamento do motor de indução monofásico (MIM) é semelhante ao motor de indução trifásico (MIT), porém não apresenta torque inicial, apresenta um único enrolamento de estator e são necessários alguns ajustes para a partida. A Figura 04 mostra um mapeamento dos principais tipos de motores existentes tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. A escolha do motor é um fator de grande importância dentro de uma aplicação, considerando os seguintes pontos:

- Condições ambientais
- Consumo e manutenções
- Métodos de controle
- E a relação entre torque e velocidade desse motor.

Com os dados de aplicação do motor definidos, pode-se chegar em uma escolha de motor que melhor atende a necessidade do cliente ou projeto.

Figura 6 - Tipos de motores de corrente contínua e alternada



Fonte: Autoria própria.

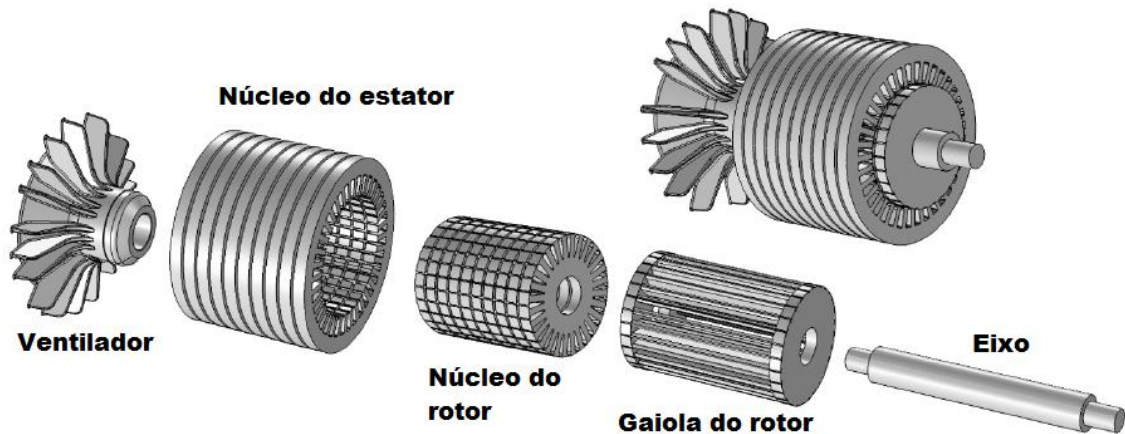
Antes de verificar o funcionamento do motor de indução, é importante observar as características construtivas desse equipamento:

- Estator: parte estática do motor, conhecida como circuito magnético estático, ele é formado por camadas de chapas com propriedades ferromagnéticas isoladas entre si.
- Rotor: parte girante do motor, compõe um núcleo ferromagnético onde se encontra um enrolamento ou conjunto de condutores paralelos. Esse rotor é alojado em uma cavidade à carga a energia mecânica gerada. Nesta cavidade, há uma distância física entre o rotor e o estator, denominada de entreferro.
- Bobinas: circuito onde circulam as correntes alternadas da fonte de alimentação do motor, esse componente é composto pelo conjunto de enrolamentos inclusos em fendas longitudinais no circuito do estator.

Os itens mencionados acima são os três principais responsáveis pelo funcionamento do motor e, além destes há outras partes mecânicas como a tampa, rolamentos, caixa de ligação, ventilador, terminais,.... Tem-se uma

melhor visão de um motor de indução através da Figura 7 que trata-se de uma vista explodida de todos os componentes que compõe esse tipo de motor.

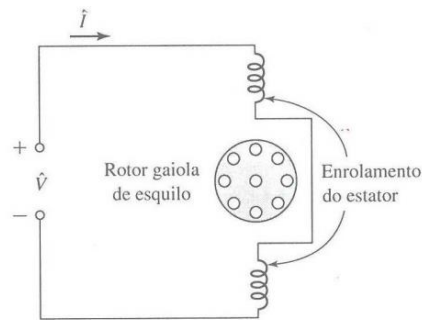
Figura 7 - Vista explodida de um motor de indução de rotor laminado



Fonte: Minh Khoa, Nguyen. p.04, 2014.

Existem dois grandes grupos de motores de indução monofásicos. O primeiro possui um enrolamento auxiliar que é responsável pela defasagem entre as fases de alimentação, o campo magnético girante é formado posicionando os enrolamentos no estator, deslocados 90° eletricamente um do outro, alimentando-se um destes com uma corrente. O segundo grupo, são os motores de polos sombreados, onde a fase da corrente é alterada através de modificações construtivas do polo do motor. A descrição dos outros tipos de MIM será discutida no próximo tópico. A Figura 8 demonstra a representação do circuito elétrico básico de um MIM rotor gaiola de esquilo.

Figura 8 - Enrolamento de um motor monofásico

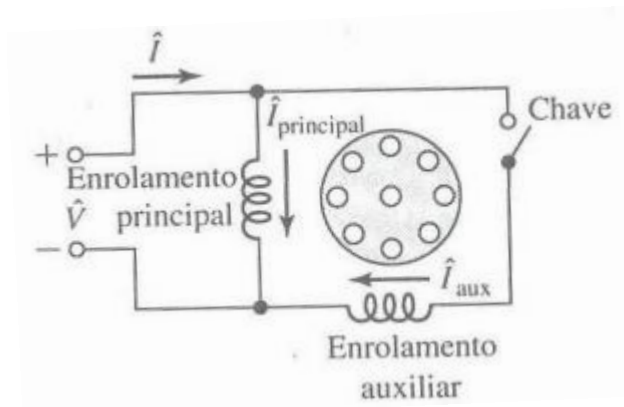


Fonte: iltec.com.br

2.4.1. “Split phase” (fase dividida)

Estes são motores que exigem pouco torque inicial e baixa potência. O circuito é composto por enrolamento principal e auxiliar, demonstrado na Figura 9, defasados em 90° entre si. O cabo do enrolamento auxiliar é mais fino do que o enrolamento principal, com isso a corrente através do enrolamento auxiliar atinge o valor máximo primeiro e depois de um tempo a corrente no enrolamento principal atinge o seu máximo. Essa característica de corrente torna o motor de fase dividida um motor de duas fases, porém desbalanceado mas devido à esses dois campos, é gerado um torque inicial e o motor é capaz de partir sozinho.

Figura 9 - Circuito elétrico do MIM com fase dividida



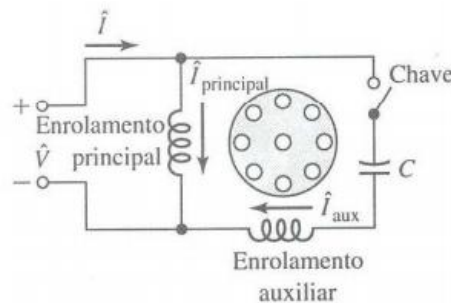
Fonte: iltec.com.br

2.4.2. Capacitor de partida

Essa configuração é muito semelhante ao motor com fase dividida, é composto de enrolamento principal e enrolamento auxiliar, porém agora temos um capacitor em série com o enrolamento auxiliar e uma chave que pode desacoplar esses componentes do sistema, este circuito é apresentado na Figura 10. Eletricamente, devido a inserção do capacitor, as fases estarão defasadas 90° elétricos uma da outra, se a corrente principal e auxiliar forem iguais este motor se transforma em um motor de duas fases balanceadas e há um torque máximo na partida.

No momento da partida deste motor não há muito ruído, porém quando o motor atingir 75% da sua velocidade síncrona e o conjunto capacitor-enrolamento auxiliar forem desconectados do sistema, poderá haver um ruído sonoro significativo.

Figura 10 - Circuito elétrico do MIM com capacitor de partida

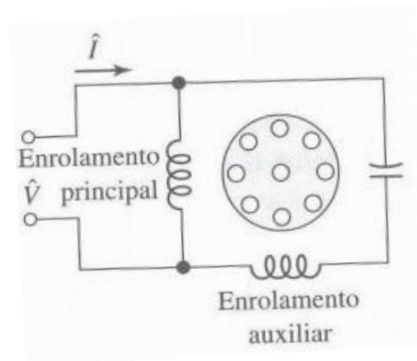


Fonte: iltec.com.br

2.4.3. Capacitor permanente

Neste motor o enrolamento auxiliar e o capacitor não são desacoplados do circuito após a partida do motor, aumentando a eficiência do motor, porém o torque inicial é sacrificado, adicionalmente este motor parte e opera de modo silencioso. Na Figura 11 podemos observar a ausência da chave que desacopla o capacitor, permanente no circuito.

Figura 11 - Circuito elétrico do MIM com capacitor permanente

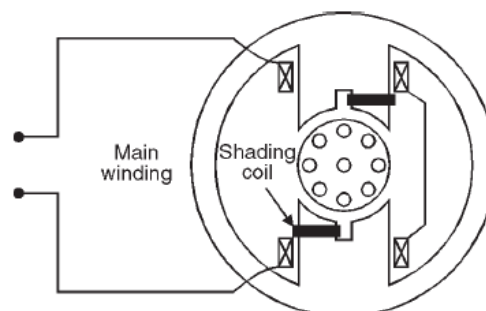


Fonte: iltec.com.br

2.4.4. "Shaded poles" (pólos sombreados)

Na Figura 12 é possível visualizar o circuito do motor de pólos sombreados, o estator possui pólos salientes onde uma porção de cada pólo é envolvida por uma espira curto-circuitada. A corrente induzida nesta espira faz com que o fluxo que a atravessa sofra um atraso em relação ao fluxo da parte não abraçada pela mesma. Apresentam baixo torque de arranque (15% a 50% do nominal), baixo rendimento e baixo fator de potência. Devido a esse fato, eles são normalmente fabricados para pequenas potências.

Figura 12 - Motor de pólos sombreados



Fonte: iltec.com.br

2.4.5. Escorregamento do motor

A velocidade relativa entre o rotor e os campos magnético é responsável pela tensão induzida no rotor da máquina, essa relação é definida por dois termos, um deles é o escorregamento e a velocidade de escorregamento.

Com isso, tem-se que a velocidade de escorregamento " n_{des} " é dada pela Equação (9).

$$n_{des} = n_s - n_m \quad (9)$$

Onde:

n_{des} é a velocidade do escorregamento;

n_s é a velocidade dos campos giratórios;

n_m é a velocidade mecânica do eixo motor.

Para o escorregamento " s ", a velocidade relativa representada em base p.u (por unidade) ou em percentagem, definida pela Equação (10):

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (10)$$

2.4.6. Frequência elétrica do rotor

No próprio rotor do motor há indução de tensões e correntes no seu próprio rotor, porém, a frequência das tensões induzidas no rotor varia inversamente com a velocidade do rotor e pode ser calculada pela Equação (11).

$$f_r = s * f_e \quad (11)$$

$$n_s = \frac{120 * f_e}{P} \quad (12)$$

Onde:

f_r é a frequência do rotor da máquina [Hz];

f_e frequência elétrica de alimentação [Hz];

P é o número de pólos da máquina.

2.4.7. Principais vantagens dos motores de indução monofásicos

Por se tratarem de motores simples de pouca manutenção e fácil controle, esses equipamentos são muito comuns em eletrodomésticos como batedeiras, liquidificadores, aspiradores de pó e etc.

2.4.8. Principais fontes de ruído em motores de indução

O princípio de funcionamento de um motor elétrico é transformar a energia elétrica que o alimenta em energia mecânica, ou seja, realizar movimento. Essa transformação entre potências não é realizada integralmente devido as perdas durante o processo que podem ser por dissipação do calor, pelo sistema de ventilação responsável pela regulação da temperatura do motor e por fim, uma parcela pequena está relacionada ao ruído sonoro.

A importância dos motores mais silenciosos é devida a maior rigidez das entidades normativas que estão exigindo motores cada vez mais silenciosos e a preocupação quanto à saúde ocupacional dos funcionários que lidam diariamente com esses equipamentos nos ambientes fabris devido as consequências causadas pelo tempo de exposição dos operadores aos ruídos já que EPI's são utilizados como complemento à proteção e não como principal amenizador dos ruídos indesejados.

A forma mais simples de amenizar os ruídos de qualquer tipo de equipamento seria através do enclausuramento parcial ou completo, porém muitas vezes essa técnica não é viável pois interfere no funcionamento do mesmo e também pode causar aumentos de temperatura indesejáveis. Com isso, a solução mais adequada para este problema seria o projeto da máquina,

com o conhecimento das suas fontes de ruído e meios de amenizá-los antes da disponibilidade comercial.

Abordando o método de controle de ruído mencionado acima, Nau e Mello (p. 40, 2001) listam como principais fontes de ruído em motores de indução: o sistema de ventilação, rolamentos e de origem magnética; vamos agrupando os dois primeiros como ruídos acústicos e o último como ruído magnético. Devido as características construtivas, os motores com fator de potência próximo de um, ou seja, de alto rendimento, necessitam de menor potência da ventilação devido às poucas perdas. De acordo com Nau e Mello (p. 42, 2001), a maior parte do ruído está associada aos ventiladores, seja devido à velocidade do fluxo de ar ou às pás que passam próximo a um componente do motor e causam o efeito sirene. Outra fonte de ruído acústico são os rolamentos do motor, apesar de não apresentarem ruídos significativos.

A última fonte de ruído, de origem magnética, é devido às ondas de força produzidas pelo campo girante por onde é realizada a transferência de potência do rotor para o estator.

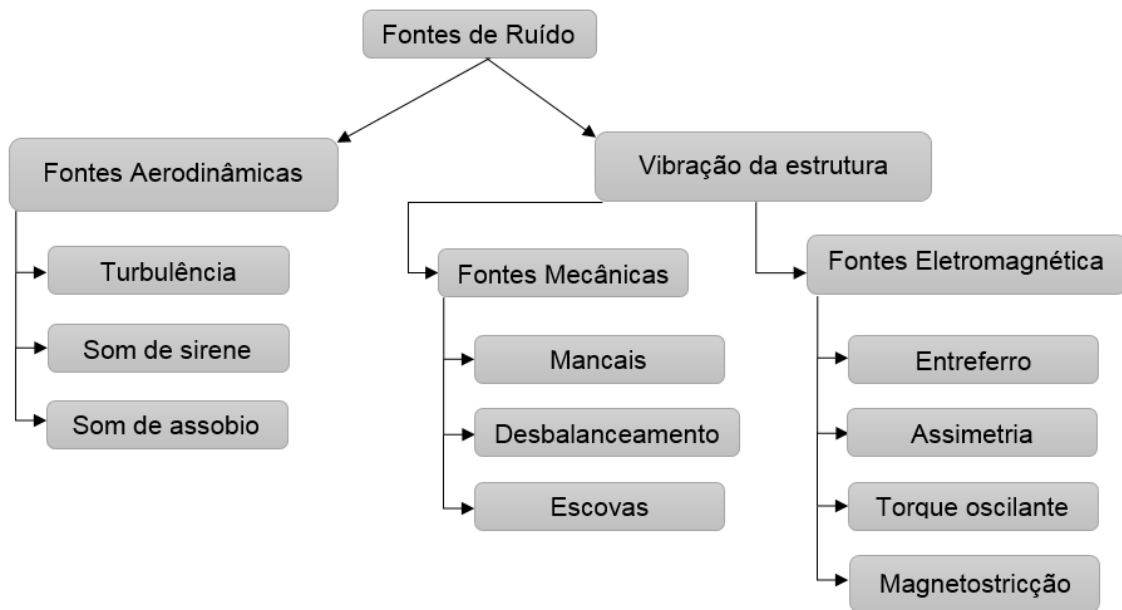
Esses principais fatores citados acima são observados na Figura 13, onde é apresentado um diagrama de blocos esquemático a ramificação das principais fontes de ruído em motores assíncronos.

Fontes de ruído aerodinâmico são causados pela turbulência do vento, efeito de sirene e som de assobio da passagem do ar pelo motor que é responsável pela refrigeração do motor.

Outra grande fonte é a mecânica que se deve aos mancais, desbalanceamento físico onde muitas vezes o motor não se encontra bem fixado ou os seus pés estão assimétricos, e por fim, as escovas.

A última fonte de ruído é a eletromagnética causada pelo entreferro, assimetria elétrica, torque oscilante e magnetostrição que é a deformação de um material eletromagnético quando sofre magnetização.

Figura 13 - Mapeamento das fontes de ruído em motores assíncronos



Fonte: Autoria própria

Quando tratamos dos níveis de intensidade sonora "*NWS*", devemos estar atentos quanto à potência do motor em questão pois a faixa de potência interfere na tolerância do ruído. O nível de potência sonora, que é medida em dB(A) é relacionada da seguinte maneira: para motores de até 7 HP (*House Power*), o nível da intensidade sonora é o mesmo para todas as potências conforme evidenciado em (13).

$$NWS = 65 \text{ dB (A)} \quad (13)$$

Acima da potência anteriormente citada, calculamos o nível da intensidade sonora a partir da Equação (14), onde *HP* é a potência do motor em *horse power* e *n* é o rendimento do motor.

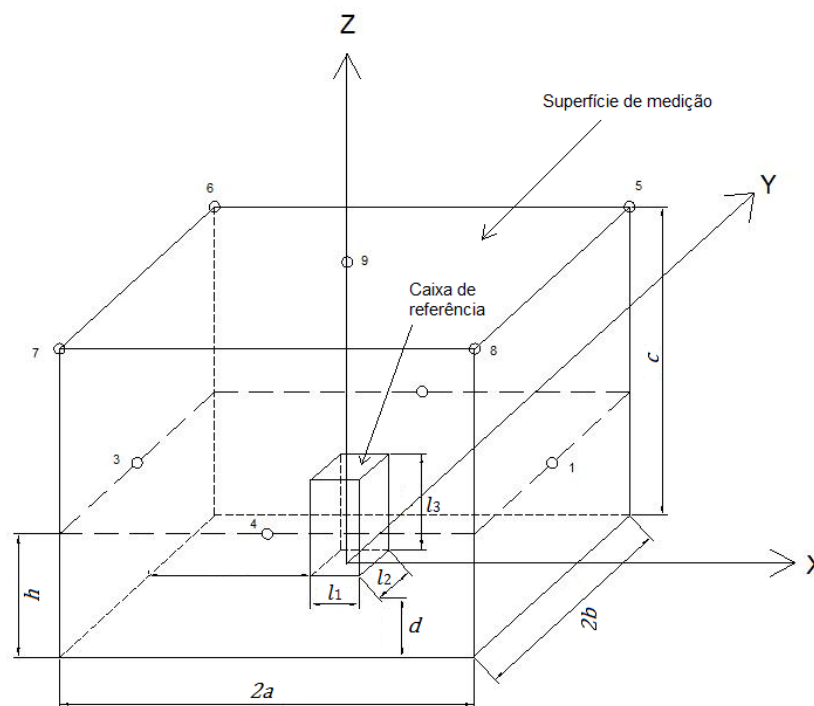
$$NWS = 20 \log(HP) + 15 \log_{10}(n) - 3 \quad (14)$$

3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE RUÍDO

Esta proposta visa a implementação da técnica de medição de ruído semelhante ao adotado pela fabricante de motores elétricos WEG, trata-se da medição da pressão sonora exercida pelo motor em funcionamento em um campo livre sobre um plano refletor.

Neste método de medição, define-se para uma caixa de referência hipotética, as dimensões " l_1 " da largura, " l_2 " da profundidade e " l_3 " da altura. Após definidos os valores, para a caixa de referência, define-se uma superfície de medição que se distânciava em um valor " d ", entre 0,25 metro e 1 metro, da borda da caixa de referência. Esta superfície de medição nada mais é do que um paralelepípedo retangular paralelo às dimensões da caixa de referência. A Figura 14 demonstra a ideia de como seria o conceito da caixa de referência e da superfície de medição, observa-se que esse método é válido para uma caixa de referência hipotética de $l_3 \leq 2m$.

Figura 14 - Ilustração do conceito de caixa de referência e superfície de medição para ensaios de ruídos em máquinas elétricas



Fonte: Adaptação de RODRIGUES, Agnaldo R. M.; Qualidade sem ruído.

A área da superfície de medição, em metros quadrados, é calculada através das Equação (15). As Equações (16), (17) e (18) são calculadas levando em consideração as respectivas dimensões " l_1 ", " l_2 " e " l_3 ". da caixa de referência e a distância de medição " d ".

$$S = 4 * (ab + bc + cd) \quad (15)$$

$$a = 0,5 * l_1 + d \quad (16)$$

$$b = 0,5 * l_2 + d \quad (17)$$

$$c = l_3 + d \quad (18)$$

As variáveis " a ", " b " e " c " são referentes aos comprimentos das arestas da superfície de medição.

Após determinados os tamanhos da caixa de referência e da superfície de medição é possível realizar o cálculo do nível de pressão sonora utilizando a Equação (19).

$$L_P = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right) \quad (19)$$

A equação resume se no cálculo do nível de pressão sonora superficial L_P medido em dB em função das N medições e do nível de pressão sonora resultante da i -ésimo ponto de medição L_{pi} . Tanto L_P quanto L_{pi} tem como referência o valor de $20 \cdot 10^{-6}$ Pascal.

3.1. ANÁLISE DE FOURIER – TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Segundo OLIVEIRA, um sinal é uma função que apresenta informações sobre o comportamento ou atributos de um fenômeno. E esse sinal pode ser uma

imagem, um áudio, sinal de GPS, entre outros, mas a característica básica é que apresente variação no espaço ou ao longo do tempo.

O tratamento dos sinais contínuos é realizado de forma mais eficiente através da transformada de Fourier pois diminui o tempo de processamento de dados que é o maior problema em projetos de grande complexibilidade e muitas vezes tornando inviável o prosseguimento do trabalho.

A transformada rápida de Fourier é obtida, primeiramente, entendendo-se que a sua base que são as séries de Fourier, transformadas de Fourier e então as variações discretas, chamada de DFT (*Discrete Fourier Transform*) e seus algoritmos rápidos conhecidos como FFT (*Fast Fourier Transform*).

A série de Fourier " $f(t)$ " em sua forma compacta é dada pela Equação (20).

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n e^{jnw_0 t} \quad (20)$$

Sendo o termo " c_n " descrito na Equação (21).

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jnw_0 t} dt \quad (21)$$

A função acima é periódica e para que possamos transformá-la em não periódica, assumimos que $T \rightarrow \infty$, ou seja, a função não irá se repetir. Com a condição assumida anteriormente, observamos que o distanciamento entre duas frequências harmônicas consecutivas " nw_0 e $(n+1)w_0$ " se torna cada vez menor.

Então, tem-se que:

$$\Delta w = (n+1)w_0 - nw_0 = w_0 = \frac{2\pi}{T} \rightarrow \frac{1}{T} = \frac{\Delta w}{2\pi} \quad (22)$$

Considerado que o período T tende a zero, isto é, $T \rightarrow \infty$, a frequência que antes era discreta, torna-se contínua, tem-se:

$$\frac{1}{T} = \frac{dw}{2\pi} \quad (23)$$

$$nw_0 \rightarrow w \quad (24)$$

Ainda considerando $T \rightarrow \infty$, podemos observar que $c_n \rightarrow 0$ e também:

$$c_n T = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (25)$$

Essa última equação (26) é conhecida como transformada de Fourier de " $f(t)$ ", ela pode ser reescrita como:

$$F(w) = \mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (26)$$

4. MEDIÇÃO E RESULTADOS

Inicialmente, são necessários alguns procedimentos na realização das medições:

- Certificar-se de que o equipamento está devidamente calibrado pois muitos equipamentos são sensíveis à diversos fatores externos como temperatura, umidade,;
- Configurar o aparelho com os devidos parâmetros de curva de ponderação, constante de tempo e fundo de escala;
- Para que não haja interrupção nas medições, atentar-se à bateria e autonomia do aparelho antes das medições;
- Verificar se não há interferência de vento no microfone, caso não seja possível mover o microfone de local, há a possibilidade de utilizar-se de dispositivos que anulam a interferência do vento no microfone;
- Atentar-se ao ambiente em que as medições estão sendo realizadas, o ruído de fundo é a principal fonte de erros nas medições de ruído;
- Antes de realizar as medições, atenção ao posicionamento do medidor que deve atender às Normas ISO 1999, ISO 1966/1 e as recomendações ISO R 131, R 266 e R 495.

Para a realização das medições utilizamos os o Dosímetro DOS-500 do fabricante Instrutherm, que apresenta apenas uma escala de ponderação "A", Tabela 3. Ao utilizar o dosímetro, apresenta-se a porcentagem da exposição diária do operador aos ruídos, diferente do método convencional de medição de nível de pressão sonora onde é realizada a leitura de modo direto no aparelho no local de trabalho do operário. A Tabela 3 apresenta um trecho do manual do dosímetro utilizado neste trabalho, observando-se que este instrumento obedece aos padrões ANSI S1.25, ISO 1991 E BS 6402:1983, além de estar configurado na curva de ponderação "A", conforme comentado anteriormente.

Tabela 3 - Características do dosímetro DOS 500

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS RETIRADAS DO MANUAL
Display de cristal líquido
Padrões aplicados: ANSI S1.25 - 1991 Ponderação A, ISSO 1999, BS 6402:1983
Microfone: condensado de eletreto de 1/2" e cabo com aproximadamente 80 cm de comprimento
Escala de ruído de Dose > 0,01 a 9999% DOSE
Nível de critério: Seleccionável entre 80, 84, 85 e 90 dB
Nível limiar: Seleccionável entre 70 ~90 dB (passos de 1 dB)
Taxa de troca (fator duplicativo): seleccionável entre 3, 4, 5, 6 dB
Detecção de nível alto: 115 dB(A)
Sinalização de pico: 140 dB
Escala de medição de nível de ruído: 70 ~ 140 dB
Precisão de $\pm 1,5$ dB
Frequência de ponderação: A
Frequência de resposta: 20 Hz ~ 10kHz
Constante de tempo: Fast(rápida) e Slow(lenta)
Capacidade de armazenamento do datalogger: aprox. 8800 dados
Temperatura e umidade de operação: 0 °C ~ 50 °C / 10 ~ 90 % RH
Temperatura e umidade de armazenamento: -10 °C ~60 °C / 10 ~ 75 % RH
Alimentação através de 4 pilhas "AAA"
Dimensões e peso: 106 x 60 x 34 mm e aprox. 350g
Acessórios: manual de instruções, estojo para transporte mod ES-08, chave de fenda pilhas, software para Windows e cabo RS-232

Fonte: Manual de instruções Instrutherm DOS-500, p.03, 2011.

A Tabela 4 demonstra os valores de potência sonora máxima de acordo com as normas vigentes no Brasil. Analisando os dados nominais de plaqueta do motor com os dados da tabela, o ruído máximo que o motor em estudo poderá apresentar é de 78 dB.

Tabela 4 - Potência sonora máxima de acordo com a norma IEC 34-9 e NBR 7565

Graus de proteção		IP 21	IP 54	IP 21	IP 54	IP 21	IP 54	IP 21	IP 54	IP 21	IP 54	IP 21	IP 54
Velocidade nominal - rpm		N < 960		960 < N ≤ 1320		1320 < N ≤ 1900		1900 < N ≤ 2360		2360 < N ≤ 3150		3150 < N ≤ 3750	
Faixas de potências nominais. P		Nível de potência sonora dB (A)											
Motores													
kW	cv												
P < 1,1	P < 1,5	71	76	75	78	78	80	80	82	82	84	85	88
1,1 < P < 2,2	1,5 < P < 3,0	74	79	78	80	81	83	83	86	85	88	89	91
2,2 < P < 5,5	3,0 < P < 7,5	77	82	81	84	85	87	86	90	89	92	93	95
5,5 < P < 11	7,5 < P < 15	81	85	85	88	88	91	90	94	93	96	97	99
11 < P < 22	15 < P < 30	84	88	88	91	91	95	93	98	96	100	99	102
22 < P < 37	30 < P < 50	87	91	91	94	94	97	96	100	99	103	101	104
37 < P < 55	50 < P < 75	90	93	94	97	97	99	98	102	101	105	103	106
55 < P < 110	75 < P < 150	94	96	97	100	100	103	101	105	103	107	104	108
110 < P < 220	150 < P < 300	97	99	100	103	103	106	103	108	105	109	106	110
220 < P < 630	300 < P < 860	99	101	102	105	106	108	106	110	107	111	107	112
630 < P < 1100	860 < P < 1500	101	103	105	108	108	111	108	112	109	112	109	114
1100 < P < 500	1500 < P < 3400	103	105	108	110	110	113	109	113	110	113	110	115
250 < P < 6300	3400 < P < 8600	105	108	110	112	111	115	111	115	112	115	111	116

Fonte: Manual de motores elétricos. KCEL Motores e fios LTDA.

Neste trabalho, o motor da fabricante WEG que submetido à medição de ruído pertence à UTFPR, campus Cornélio Procópio, com número de patrimônio 119203. Os dados da plaqueta do motor são exibidos na Figura 15. Trata-se de um motor assíncrono monofásico com potência de 1/8 cavalo-vapor, IP 21, velocidade nominal de 1740 rpm e tensão de alimentação do motor foi realizado em 220V.

Figura 15 - Dados da plaqueta do motor em análise.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 16 é mostrado como foi realizada a medição de ruído do motor no eixo Z, sendo possível verificar o microfone posicionado acima do motor em um suporte. O motor foi alocado sobre uma camada de borracha para que as medições não sofressem interferência de ruído devido a vibração já que o motor não foi fixado à mesa.

Figura 16 - Medição no eixo Z



Fonte: Autoria própria

A medição no eixo Y foi feita conforme a Figura 17, na lateral do motor.

Figura 17 - Medição no eixo Y



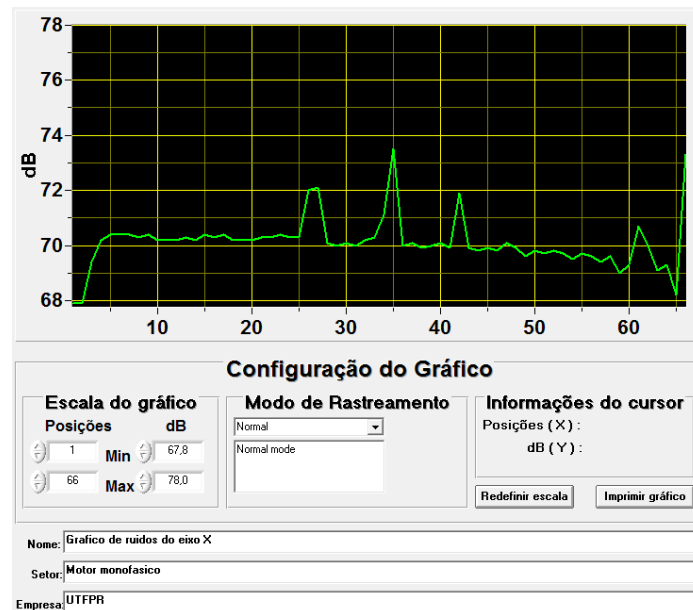
Fonte: Autoria própria

A medição no eixo X foi realizada, porém não apresenta-se nesse trabalho a foto durante a sua execução.

Após a medição do ruído, os dados coletados foram analisados e gerados os gráficos de ruído de cada eixo. A Figura 18 apresenta o gráfico de ruído do eixo X, é possível notar que o tempo de exposição foi por volta de 65 minutos e

o maior valor atingido foi de aproximadamente 73,5 dB no minuto 35, mínimo de 65 dB próximo dos 60 minutos.

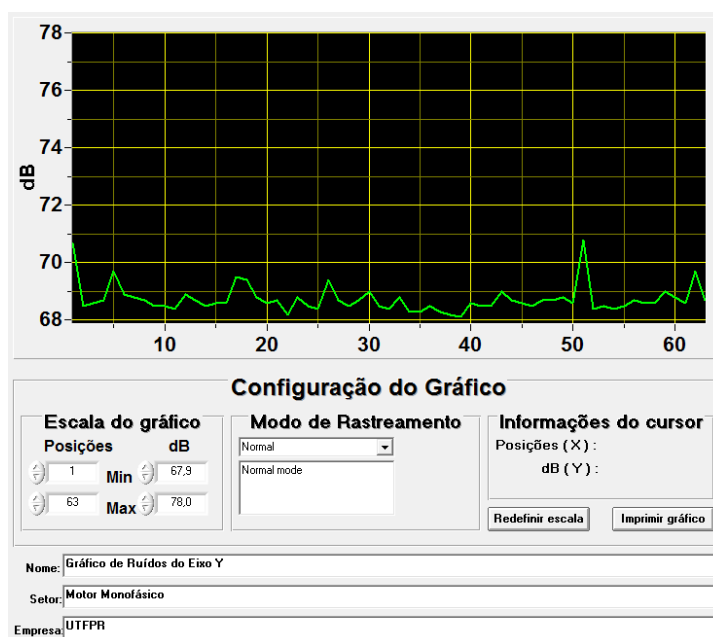
Figura 18 - Gráfico gerado a partir da medição do ruído no eixo X



Fonte: Autoria própria

Para o eixo Y, na Figura 19, tem-se que o tempo de exposição foi muito similar ao do eixo X, o pico de ruído atingido foi de 70,8 dB em 51 minutos de medição, mínimo de 68 dB após 22 minutos de medição.

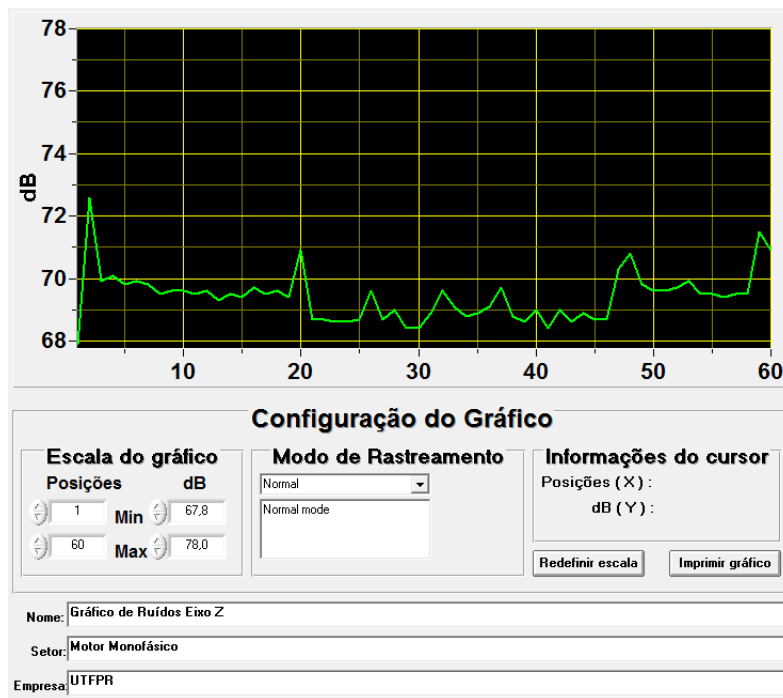
Figura 19 - Gráfico gerado a partir da medição do ruído no eixo Y



Fonte: Autoria própria

Para finalizar, na Figura 20, as medições no eixo Y nos mostram um pico de ruído de aproximadamente 71 dB após 51 minutos de medição e um mínimo de 68 dB No minuto 22 e também no 38. O tempo total de medição para esse eixo foi homogêneo ao restante.

Figura 20 - Gráfico gerado a partir da medição do ruído no eixo Z

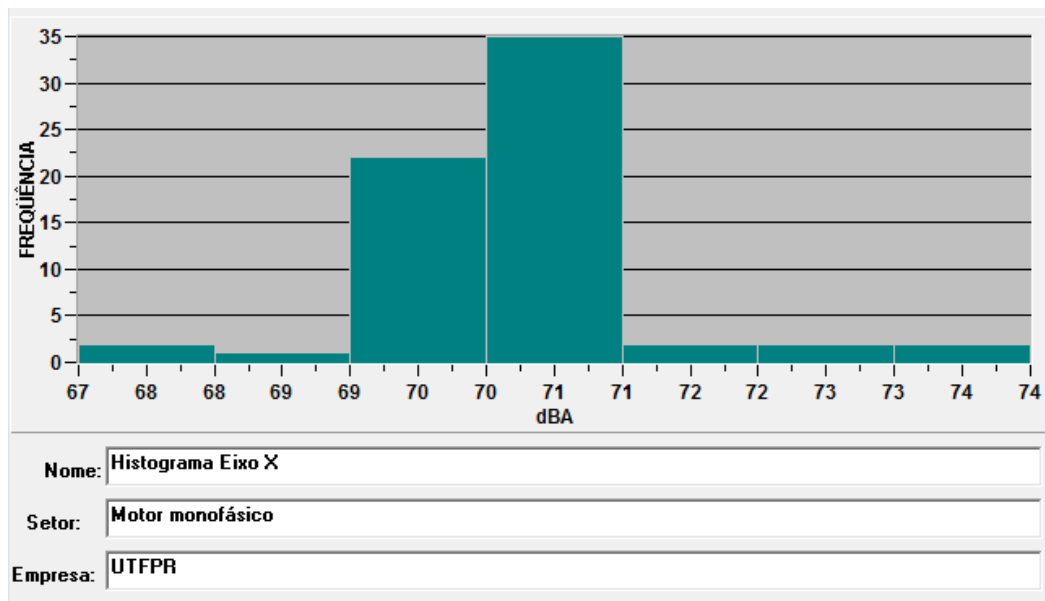


Fonte: Autoria própria

Tomando como base os gráficos de ruído, foi gerado o histograma de frequência com que um determinado range de decibéis foi medido. É possível visualizar de modo mais claro nas figuras a seguir.

A Figura 21 representa o histograma do eixo X, pode-se observar que o ruído entre 70 e 71 dB apareceram com maior frequência, enquanto o ruído entre 69 e 70 dB aparecem com menor frequência.

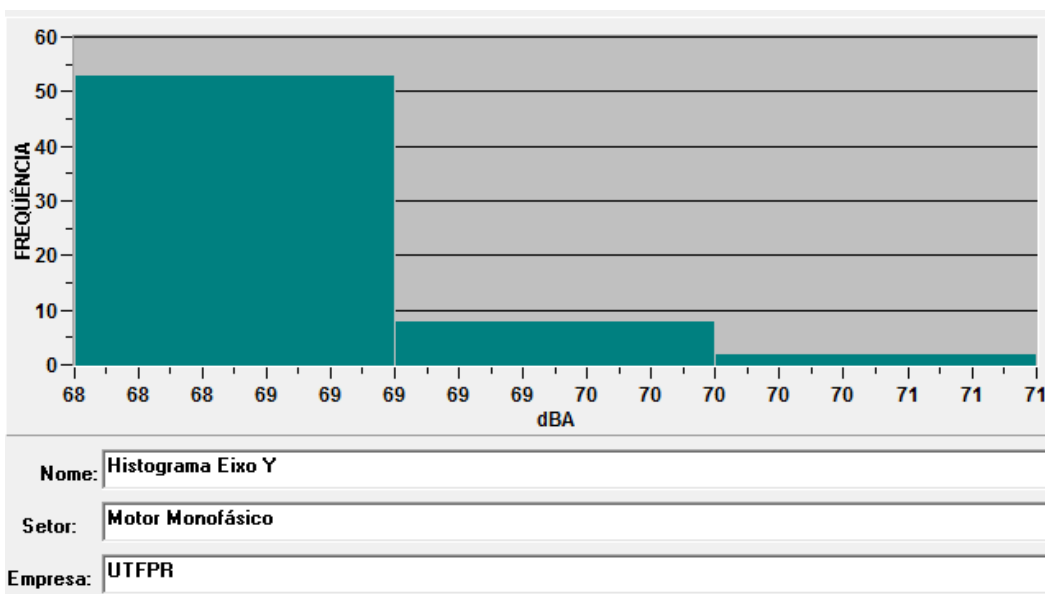
Figura 21 - Histograma gerado a partir da medição do ruído no eixo X



Fonte: Autoria própria

Para o eixo Y, a Figura 22 nos mostra que o ruído entre 68 e 69 dB apresentam maior frequência de medição enquanto o ruído entre 70 e 71 são os ruídos de menor frequência.

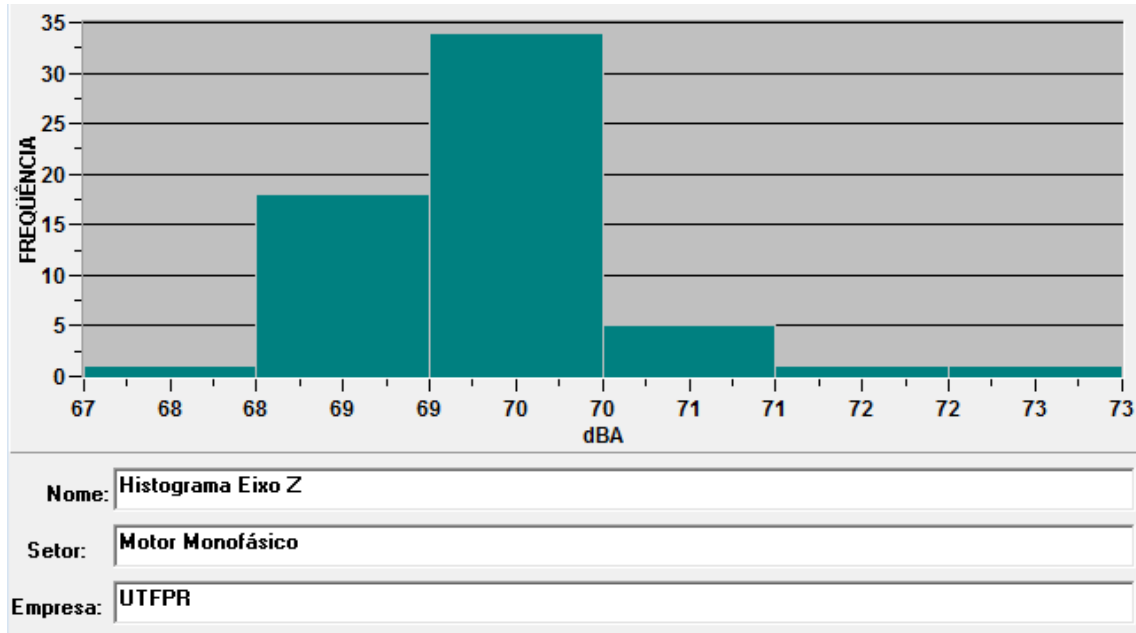
Figura 22 - Histograma gerado a partir da medição do ruído no eixo Y



Fonte: Autoria própria

Por fim, o histograma do eixo Z, demonstrado pela Figura 23, mostra que o ruído entre 69 e 70 obteve maior frequência enquanto o ruído de menor frequência situase entre 67 e 68 dB e também 71 e 73 dB.

Figura 23 - Histograma gerado a partir da medição do ruído no eixo Z



Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido consistiu em estudar um método de medição de ruído acústicos em motores e a verificação dos dados obtidos, a fim de verificação de limites de nível sonoro máximos desse motor em estudo. Neste caso, foi utilizado apenas um motor da fabricante WEG, porém a técnica de medição pode ser utilizada em motores de outros fabricantes e outras faixas de potência. Além disso, foi utilizado um dosímetro pela falta de um decibelímetro com data logger, os ruídos de cada eixo foram medidos em momentos diferentes devido à falta de instrumentos em número suficiente para realizar as medições simultaneamente, sendo assim a diferença nos gráficos de ruído de cada eixo.

Através da coleta dos níveis de ruído nos 3 eixos principais do motor, sendo eles: eixo do motor, lateral e superior, foi possível gerar o gráfico do ruído versus tempo dos 3 eixos, e para melhor análise dos dados foi gerado o histograma de frequência versus dB desses eixos em estudo. As medições foram realizadas no laboratório LAbSIEE, sala I-101, onde está sendo iniciada a construção de uma câmara acústica justamente para medição de ruídos em motores e transformadores, portanto a sala ainda não apresenta as características devidas para as medições sem que haja interferência do meio externo, que são justamente os picos de ruído detectados das medições.

Conforme a norma IEC 34-9 e NBR 7565, o valor máximo de ruído acústico para um motor de mesma configuração seria de 78 dB. Pela experimentação realizada, nota-se que os valores obtidos nos 3 eixos não ultrapassam esse valor, sendo assim, o motor submetido à análise está dentro do limite de ruído e de acordo com as normas vigentes. Salienta-se que o motor utilizado nesse trabalho já é um motor antigo, onde não há informações sobre as suas manutenções e condições de conservação, com isso, é possível que uma parcela do ruído coletado seja referente à esse desgaste e falta de manutenções.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Com a finalização deste trabalho, é possível expandir o conhecimento adquirido através de trabalho subsequentes que poderão ser:

- Estudo e avaliação da medição de ruído para motores de maior potência, comprovando a equação (13) e (14);
- Realização do experimento com motores de outras faixas de potências e outros fabricantes;
- Verificação de diferenças nos níveis de ruídos em motores novos comparados à motores antigos com mesmas características construtivas e de mesma potência;
- Realização do estudo das diferenças entre os ruídos dos motores assíncronos monofásicos e trifásicos;
- Estudo e experimentação de métodos de diminuição de ruído em motores;
- Realização do experimento com decibelímetro com *data logger* em todos os eixos simultaneamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, F. E. **Controle de ruído em motores de indução trifásicos de médio e grande porte**. Florianópolis, SC, 2008.

ÁVILA, Geraldo. **Variáveis complexas e aplicações**. LTC, 2008.

BOYCE, W. E.; DI PRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

Basic Concepts of Sound. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S; 1998.

Basic Frequency Analysis of Sound. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S; 1998.

Vibration Measurement and Analysis. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S; 1998.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. xix, 684 p.

CUNHA, Sandra. **Queda de produção, surdez ocupacional, baixo resultado no trabalho são algumas das consequências dos ambientes com forte influência de ruídos**. Edição 316. Revista CIPA. 2006.

EGGERT, Walmor von et al. **Ruído magnético em motores de indução monofásicos com rotor de gaiola**. 2007.

FIGUEIREDO, Djairo. **Análise de Fourier e Equações Diferenciais Parciais**. 4ª edição. Rio de Janeiro: IMPA–2003. Abr Mai Jun Jul Ago Set Out Nov Dez Fev, 2012.

FITZGERALD, ARTHUR E. et al. **Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. 2006.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: UFSC, 2000.

GEWEG. **Motores síncronos**. Disponível em: Acesso em set/2017.

HALLIDAY. D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentos de física: Gravitação, ondas e termodinâmica**. 10ª edição vol. 2. Editora LTC, 2016.

IRWIN, J. David; NELMS, R. Mark. **Análise básica de circuitos para engenharia**. 10. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013. xvi, 679 p.

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15.ed. São Paulo, SP: Globo, 2005. 667 p.

NAU, Sebastião L.; MELLO, Hugo Gustavo Gomes. **Ruído sonoro em motores elétricos de indução: causas e soluções**. Edição 315. 2001.

NAU, Sebastião Lauro – TT88.011 **Determinação do ruído magnético em motores elétricos de indução**. WEG Motores Ltda, Jaraguá do Sul – SC, 1988.

OLIVEIRA, O. R. B. **Transformada de Fourier**. [S.l.]: USP, 2015. Citado na página [19](#).

RODRIGUES, Agnaldo R. M.; **Qualidade sem ruído**. WEG Motores Ltda, Jaraguá do Sul – SC. Mar. - Abr, 2000.

ZILL, D. G.; CULLEN, M. R. **Matemática Avançada para Engenharia**. Vol I. e II. Bookman Editora, 2009.