



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

Engenharia Elétrica

**Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução
trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do
espectro de corrente**

Klariman Yasmin da Silva Pereira

Campo Grande MS

Julho de 2021



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

Engenharia Elétrica

Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente

Klariman Yasmin da Silva Pereira

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Luciana Cambraia Leite

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Mato Grosso do Sul na Faculdade de
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo
e Geografia, como requisito parcial
para obtenção do título de
Engenheiro(a) Eletricista.**

Campo Grande MS

Julho de 2021

Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Luciana Cambraia Leite

Prof. Dr. Luigi Galotto Júnior

Prof. Dr. Marcio Luiz Magri Kimpara

Campo Grande MS

Julho de 2021

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Klariman Yasmin da Silva Pereira, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 001.920.742 e CPF nº 049.912.201-14, declaro que o “Trabalho de Conclusão de Curso” apresentado, com o título “Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 16 de julho de 2021.

Klariman Yasmin da Silva Pereira

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Damião e Ilca que sempre me incentivaram a buscar conhecimento.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com a ajuda de diversas pessoas que ao longo do curso me apoiaram em todos os momentos. Agradeço de forma especial meus pais que sempre me ofereceram todo suporte necessário para que chegasse à conclusão deste curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço a professora orientadora que esteve sempre à disposição para sanar minhas dúvidas referente ao trabalho.

Aos meus amigos e namorado, agradeço pela compreensão das ausências e pelo afastamento temporário.

Agradeço a empresa Solver que disponibilizou seus equipamentos e conhecimento para realização das simulações necessárias.

RESUMO

Este trabalho mostra a relevância de aplicação de técnicas preditivas na manutenção e irá expor que quanto mais técnicas se utilizar para predição de falha em um equipamento tão relevante como o motor de indução trifásico é para a indústria, melhor será para uma intervenção assertiva quando necessário. Além disso, sem que haja paradas de processos inesperadas que gerem transtornos para produção e custos da empresa.

O estudo proposto baseia-se na investigação de falhas introduzidas, propositalmente, em uma bancada de teste; composta por motor, coletor CSI 2120 com seus sensores de vibração e corrente e o Software AMS SUITE, a fim de diagnosticar e analisar os gráficos em espectros para definição da severidade da falha aplicada.

Os resultados encontrados com as 11 leituras obtidas em cada simulação para a análise de vibração e para análise de espectro de corrente foi que os métodos são técnicas complementares, em conjunto possibilitam maior assertividade quando há necessidade de diagnosticar a falha presente no motor de indução. Apesar do desbalanceamento inicial presente na máquina utilizada, foi possível observar que a medida que era incorporado defeitos a máquina tem seu desbalanceamento mais evidente, sendo devido ao desbalanceamento do campo magnético provocado ao provocar desbalanceamento na fonte de alimentação de energia do motor de indução.

Palavras-Chave: Manutenção preditiva, análise de vibração, máquinas elétricas, falhas elétricas, motor de indução, análise de corrente, espectro de corrente.

ABSTRACT

This work will show the relevance of applying predictive techniques in maintenance and will show that the more techniques used for failure prediction in equipment as relevant as the three-phase induction motor is for the industry, the better it will be for an assertive intervention when necessary. Without acting unexpected stops of processes that generate inconvenience for production and costs of the company.

The proposed study is based on the investigation of failures purposely introduced in a test bench, composed of motor, CSI 2120 collector with its vibration and current sensors and the AMS SUITE Software to diagnose and analyze the graphs in spectra to define the severity of the fault applied.

The results found with the 11 readings obtained in each simulation for the vibration analysis and for the current spectrum analysis was that the methods are complementary techniques, together they allow greater assertiveness when there is a need to diagnose the fault present in the induction motor. Despite the initial unbalance present in the machine used, it was possible to observe that as defects were incorporated the machine had its most evident unbalance, being due to the unbalance of the magnetic field caused by causing unbalance in the power supply of the induction motor.

Keywords: Predictive maintenance, vibration analysis, electrical machines, electrical faults, induction motor, current analysis, current spectrum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre os custos de paradas, manutenção e a importância do programa de manutenção	14
Figura 2 – Probabilidade de ocorrência de falhas no motor de indução.	15
Figura 3 – Tipos de manutenção	16
Figura 4 – Tipos de manutenção preditiva.....	18
Figura 5 – Diagrama com especificações dos motores elétricos.....	22
Figura 6 – Motor de indução trifásico em corte.....	23
Figura 7 – (a) Tensão Induzida Máxima. (b) Tensão e corrente máxima Induzida.. (c) Tensão Líquida.	25
Fonte: Adaptado de Guia de especificação - motores elétricos WEG, 2021.	26
Figura 8 – Conjugado x velocidade do motor de indução trifásico.	28
Figura 9 – Circuito simplificado (monofásico) do motor de indução.....	28
Figura 10 – Diagrama de fluxo de potência do motor de indução	29
Figura 11 – Exemplo de placa de identificação de motor elétrico.	30
Figura 12 – Representação da defasagem dos parâmetros de vibração - Forma de onda.	35
Figura 13 – Amplitude em função da frequência tomada em deslocamento, velocidade e aceleração - Espectro	35
Figura 14 – Representação gráfica do domínio da frequência e do tempo	37
Figura 15 – Sinais no domínio da frequência.	38
Figura 16 – Sistema básico para medição de vibração	38
Figura 17 – Pontos de medição lado do acionamento da máquina (LA) definidos de acordo com o item 4.2 da norma ABNT NBR 10082.	39
Figura 18 – Pontos recomendados pela norma ABNT NBR 10082.	40
Figura 19 – Coletor de vibração analisador CSI 2120.....	41
Figura 20 - Anéis em Curto/Barras Trincadas ou Quebradas.	43
Figura 21 - Conector solto.....	44
Figura 22 - Excentricidade no Estator.....	45
Figura 23 - Excentricidade Rotor.....	45
Figura 24 – Sistema básico para análise espectral da corrente.....	47
Figura 25 – Exemplo de sinal no domínio do tempo e domínio da frequência.	47
Figura 26 – Exemplo de sinal no domínio do tempo e domínio da frequência.	49

Figura 27 – Espectro de corrente típico de um motor de indução em boas condições.....	50
Figura 28 – Espectro de corrente típico de um motor de indução com defeito nas barras no rotor.	50
Figura 29 – Excentricidade do entreferro.	52
Figura 30 – Espectro padrão de excentricidade do entreferro estática.....	52
Figura 31 – Espectro padrão de excentricidade do entreferro dinâmica.....	53
Figura 32 – Bancada de teste.....	55
Figura 33 – Motor de indução WEG.....	56
Figura 34 – Placa do motor de indução WEG.	56
Figura 35 – Massa de 900g para simular carga acoplada ao rotor do MIT.	57
Figura 36 – Acelerômetro piezoelétrico (transdutor sísmico).....	57
Figura 37 – Alicate Amperímetro FLUKE i400s.	58
Figura 38 – Coletor CSI 2120.	58
Figura 39 – Adaptador de entrada do analisador CSI 2120.	59
Figura 40 – Configuração para realização da 1ª leitura.....	59
Figura 41 – Configuração para realização da 2ª leitura.....	60
Figura 42 – Configuração para realização da 3ª, 4ª e 5ª leitura.....	60
Figura 43 – Configuração para realização da 6ª, 7ª e 8ª leitura.....	61
Figura 44 – Configuração para realização da 9ª leitura.....	61
Figura 45 – Configuração para realização da 10ª leitura.....	62
Figura 46 – Configuração para realização da 11ª leitura.....	62
Figura 47 – Interface do Software utilizado para as análises MCSA e de vibração.....	63
Figura 48 – Interface do AMS Suite com os pontos de medição configuração para simulação do MIT estudado.....	64
Figura 49 – Curvas de tendências LA.	65
Figura 50 – Curvas de tendências LOA.	66
Figura 51 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT sem carga.....	67
Figura 52 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT sem carga.	68
Figura 53 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT sem carga.	69
Figura 54 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT sem carga.....	70
Figura 55 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT sem carga.	71
Figura 56 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga.	72
Figura 57 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT com carga.....	73

Figura 58 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga.....	74
Figura 59 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga.	75
Figura 60 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT com carga.....	76
Figura 61 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.....	77
Figura 62 – Gráficos com espectros no sentido vertical LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.....	79
Figura 63 – Gráficos com espectros no sentido axial LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.....	81
Figura 64 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.....	83
Figura 66 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.....	87
Figura 67 – Gráficos com espectros no sentido vertical LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.....	89
Figura 68 – Gráficos com espectros no sentido axial LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.....	91
Figura 69 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.....	93
Figura 70 – Gráficos com espectros no sentido vertical LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.....	95
Figura 71 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga e torção na tampa. .	97
Figura 72 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT com carga e torção na tampa.....	98
Figura 73 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga e torção na tampa.	99
Figura 74 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga e torção na tampa.	100
Figura 75 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT com carga e torção na tampa. .	101
Figura 76 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga e barra do estator com abertura.....	102
Figura 77 – Gráfico com espectro sentido Vertical LA - MIT com carga e barra do estator com abertura.....	103
Figura 78 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga e barra do estator com abertura.....	104

Figura 79 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga e barra do estator com abertura.....	105
Figura 80 – Gráfico com espectro sentido Vertical LOA - MIT com carga e barra do estator com abertura.....	106
Figura 81 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.....	107
Figura 82 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.....	108
Figura 83 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.	109
Figura 84 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.....	110
Figura 85 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.....	111
Figura 86 – Gráfico de tendência com espectro de corrente.	112
Figura 87 – Gráfico de espectro de correntes fases R (a), S (b) e T (c) – MIT sem carga e sem defeito.....	113
Figura 88 – Gráfico de espectro de corrente fases R, S e T – MIT com carga e sem defeito..	115
Figura 89 – Gráfico de espectro de correntes fases R, S e T – MIT com carga e borne solto..	117
Figura 90 – Gráfico de espectro de correntes fases R, S e T – MIT com carga e torção na carcaça.	119
Figura 91 – Gráfico de espectro de correntes fases R, S e T – MIT com carga e barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.....	121
Figura 92 – Gráfico de tendência das medições realizadas na fase R.....	124
Figura 93 – Gráfico de tendência das medições realizadas na fase S.	125
Figura 94 – Gráfico de tendência das medições realizadas na fase T.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Velocidades Síncronas.	26
Tabela 2 – Quadro com resumo de técnicas de manutenção preditiva em motores elétricos	33
Tabela 3 – Unidades de medida da amplitude no sistema métrico	35
Tabela 4 – Níveis de vibração ISO 10816-3 para motores Classe I, II, II e IV	42
Tabela 5 – Níveis de vibração ISO 2372 para motores Classe I, II, II e IV	42
Tabela 5 – Severidade de defeito no rotor e recomendações para diagnóstico de análise de corrente.	51
Tabela 6 – Severidade de excentricidade	54
Tabela 7 – Severidade de defeitos e recomendações para diagnóstico de análise de corrente. ...	54
Tabela 8 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA - MIT com carga e bornes soltos.....	79
Tabela 9 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido vertical LA - MIT com carga e bornes soltos.....	81
Tabela 10 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido axial LA - MIT com carga e bornes soltos.....	83
Tabela 11 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LOA - MIT com carga e bornes soltos.....	85
Tabela 12 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido vertical LOA - MIT com carga e bornes soltos.....	87
Tabela 13 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA -- MIT com carga e fases soltas.....	89
Tabela 14 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA - MIT com carga e fases soltas.....	91
Tabela 15 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido axial LA - MIT com carga e fases soltas.	93
Tabela 16 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LOA - MIT com carga e fases soltas.....	95
Tabela 17 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido vertical LOA T - MIT com carga e fases soltas.....	97
Tabela 18 – Medições simuladas classificadas de acordo com a norma ISO 10816-3 - Valores de velocidade RMS de vibração de todos os pontos de coleta do motor de indução ensaiado.....	123

SUMÁRIO

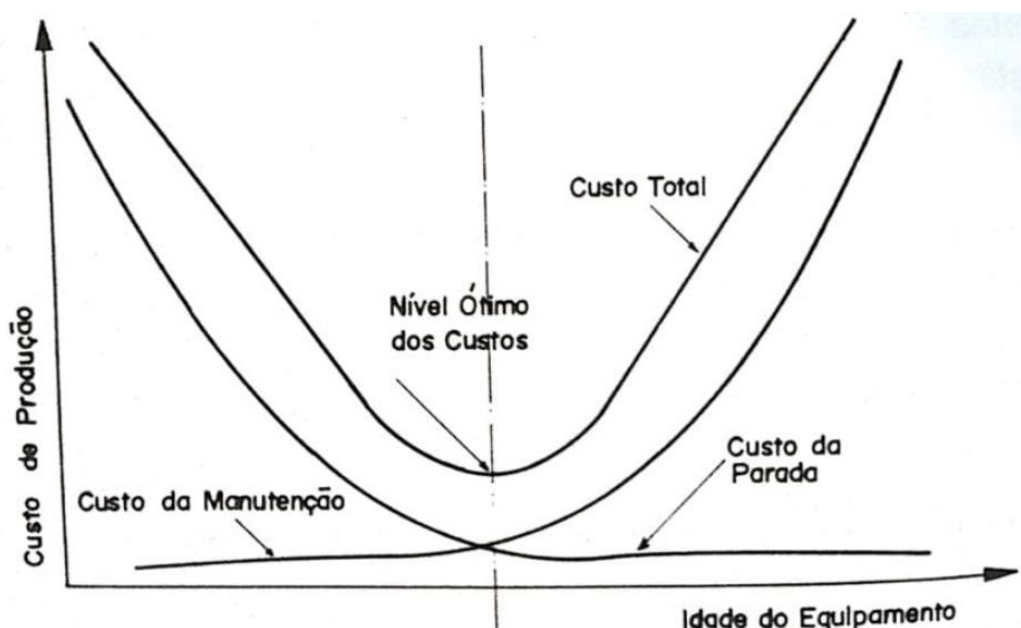
1. INTRODUÇÃO	14
1.2. JUSTIFICATIVA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	19
1.3. OBJETIVOS.....	19
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO (RESUMO DOS CAPÍTULOS):.....	20
2. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	21
2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS	22
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	24
2.3 TIPOS DE FALHAS ELÉTRICAS DOS MOTORES DE INDUÇÃO	30
3. TÉCNICAS DE ANÁLISES PREDITIVAS.....	32
3.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	33
3.1.1 COLETA DE DADOS.....	38
3.1.2 ANÁLISE DE DEFEITOS COM ORIGEM ELÉTRICA.....	43
3.2 ANÁLISE DE ESPECTRO DE CORRENTE (MCSA)	46
3.2.1 COLETA DE DADOS.....	46
3.2.2 ANÁLISE DE DEFEITOS	48
4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	55
5. RESULTADOS.....	65
5.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	65
5.2 ANÁLISE DE ESPECTRO DE CORRENTE	111
5.3 DISCUSSÃO DO RESULTADO	122
6. CONCLUSÕES GERAIS.....	127
7. REFERÊNCIAS	128

1. INTRODUÇÃO

A manutenção é um conjunto de cuidados técnicos indispensáveis, de grande valia nas indústrias que prezam pela constante produtividade, confiabilidade e disponibilidade de seus equipamentos. De acordo com Nepomuceno (1989), de um modo geral, as finalidades de manutenção consistem em conservar os equipamentos em condições de funcionamento com custo reduzido.

O setor industrial possui preocupação com a qualidade e eficiência de seu processo de produção, com o menor custo possível. Considera-se que nenhum equipamento continuará operando com desempenho satisfatório à medida que o tempo passa, portanto, as empresas entendem a necessidade de aplicação de uma estratégia de manutenção confiável e segura. O gráfico representado pela Figura 1 ilustra, de maneira esquemática, as relações entre os custos de manutenções, paradas e a relevância de seu planejamento

Figura 1 – Relação entre os custos de paradas, manutenção e a importância do programa de manutenção.

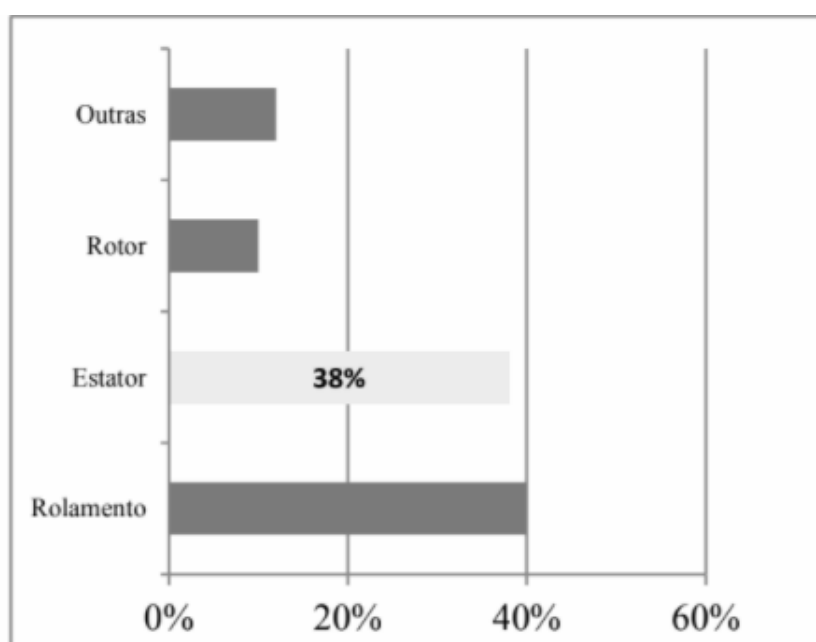


Fonte: Nepomuceno, 1989.

Os motores elétricos desempenham um papel de grande importância para os processos industriais atuais. São esses equipamentos que garantem uma grande parcela do processo de produção das fábricas. Levando em consideração a relevância dos motores elétricos para as indústrias, é de suma importância garantir que os mesmos trabalhem sem sobrecarga, a fim de evitar danos a este. (Nepomuceno, 1989).

Durante seu período de vida útil, os motores podem vir a falhar. Segundo Filho, Guilherme Filippo (2013), as falhas podem ter causas elétricas ou mecânicas e ocorrem em componentes específicos, como rolamentos, enrolamentos de estator e rotor, eixos, etc. Conforme exposto por PB Junior et al., (2013), entre os tipos de falhas elétricas em um motor podem-se citar os problemas no enrolamento de estator, enrolamento de rotor, barras quebradas, anéis quebrados e conexões. Estudos abrangendo setores industriais apontam a seguinte estimativa para distribuição de falhas, conforme apresentado na Figura 2: os 38% de falhas que ocorrem no estator podem ser de curto-circuito entre as espiras, curto-circuito entre os enrolamentos e curto-circuito entre a carcaça do motor com o enrolamento do estator.

Figura 2 – Probabilidade de ocorrência de falhas no motor de indução.



Fonte: P.B. Junior, A. Goedel, C.L. Graciola, 2013.

Apesar de serem robustos e normalmente bem construídos, a possibilidade de falha é intrínseca às máquinas (P.B. Junior, A. Goedel, C.L. Graciola, 2013). Estes estudos indicam que diversos fatores influenciam na taxa de falhas deste equipamento, entre eles está a idade média dos motores, política de manutenção, severidade das operações, qualidade do fornecimento de energia e capacitação da mão de obra (Filippo Filho, 2013).

Filippo Filho ainda em seu livro sobre Motores de Indução, definiu a Equação 1.1, que determina a taxa de falha para esses motores:

$$\lambda = \frac{\text{nº de falhas/ano}}{\text{total de motores}} \quad (1.1)$$

Com objetivo de reduzir o máximo possível as taxas de falhas a fim de se evitar paradas de produção inesperadas, as indústrias fazem uso das atividades de manutenção, que pode ser entendida como a ação de reparar ou executar serviços em equipamentos e sistemas (Bonaldi, 2005). Tais ações, mais comuns, podem ser classificadas em quatro grupos principais, conforme representado na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de manutenção.



Fonte: Autor

Manutenção corretiva: definida no item 2.8.8 da NBR 5462 (1994, p.7) como “*Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a realocar um item em condições de executar uma função requerida.*” Portanto, este tipo de manutenção ocorre para corrigir algo no equipamento, ou seja, é realizada após a ocorrência da falha. Ao ser aplicada, a manutenção corretiva garante que o ativo volte a desempenhar papel dentro do processo de produção, de acordo com seu objetivo operacional definido ainda em projeto.

Esse tipo de manutenção tem como desvantagens a parada não-programada, redução de vida útil da máquina e consumo elevado de energia, pois quando há presença de falha no motor, o mesmo tem suas perdas aumentadas e desempenho reduzido (Bonaldi, 2005).

Quando ocorre de forma desprogramada, tal manutenção possui um custo maior do que se fosse programada. Desta forma, o tipo de manutenção emergencial além de interromper o processo de produção, gera um custo maior comparado aos demais tipos de manutenção a seguir.

Manutenção preventiva: definida no item 2.8.7 da NBR 5462 (1994, p.7) como “*Manutenção efetuada em intervalos predeterminados ou, de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.*” Sendo assim, tem como principal proposta evitar que a falha no motor elétrico ou equipamentos em geral ocorra, ou seja, a manutenção é realizada ainda com a máquina em condições operacionais satisfatórias. Este tipo de manutenção objetiva impedir que o ativo trabalhe em condições que tragam redução em seu rendimento diante do processo de produção.

Manutenção preventiva é um método de controle realizado para redução de falhas ou declínio no desempenho, através de um planejamento fundamentado em períodos estabelecidos de tempo. Uma das garantias de sucesso de uma boa preventiva está na determinação dos intervalos de tempo (Otani, 2008).

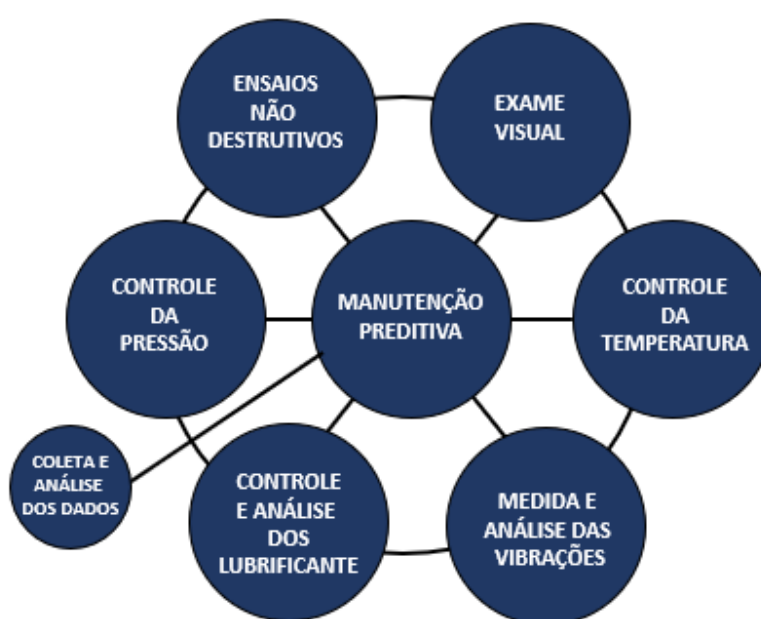
Conforme apresentado por Erick Leonardo Bonaldi 2005, a manutenção preventiva deve ser elaborada através de um conjunto de medições tecnicamente adequadas e selecionadas, priorizando o custo e a confiabilidade oferecida na operação do equipamento. Esse programa de manutenção pode optar por três tipos de atividades: o monitoramento contínuo da máquina, medições periódicas e a utilização de técnicas preditivas.

Manutenção preditiva: definida no item 2.8.9 da NBR 5462 (1994, p.7) como “*Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, a fim de reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.*”

A preditiva oferece à indústria vantagens econômicas ao permitir redução dos custos de manutenção, evita paradas inesperadas e aumenta a vida útil do equipamento e maquinário, normalmente de custo apreciável. Sua implantação é considerada simples e fácil, bastando treinamento de colaboradores e considerando a existência de um profissional mais especializado para coordenação dos demais (Baldissarelli, 2019).

Com o intuito de evidenciar de maneira esquemática o funcionamento da manutenção preditiva, na Figura 4 estão ilustrados os elementos fundamentais levados em consideração para aplicação de um programa de manutenção preditiva. Na figura há algumas técnicas e métodos utilizados neste tipo de manutenção.

Figura 4 – Tipos de manutenção preditiva.



Fonte: Adaptado de Nepomuceno, 1989.

Manutenção detectiva: conforme definido por Santos (2019), na manutenção detectiva o ativo ao ser comissionado realiza uma auto averiguação (*self-test*) e indicam se existe alguma irregularidade, podendo a verificação ocorrer em período de operação ou parada. A manutenção detectiva também pode ser definida como o modo de atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção (Paschoal, 2009).

1.2. JUSTIFICATIVA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A área da manutenção vem se destacando cada vez mais através de estudos e desenvolvimento de tecnologias com objetivo de tornar a indústria mais produtiva e os gastos com maquinário cada vez menor. Toda fábrica que visa produzir algo, tende a desenvolver programas de manutenção e, portanto, torna-se necessário capacitar sua equipe e acompanhar as novas tecnologias presentes no mercado, a fim de para manter seus equipamentos operando com o melhor rendimento possível.

Este trabalho de conclusão de curso visa apresentar uma forma de aplicação prática da manutenção preditiva que pode ser utilizada pelas indústrias que possuem motores elétricos compondo uma parcela considerável de seu parque de ativos em operação e precisam de um acompanhamento adequado e que não necessite realizar paradas em seu processo de produção para detecção de possíveis falhas.

Baseado na necessidade existente em reduzir gastos com falhas em motores elétricos que ocasionam custos elevados ao parque industrial, o trabalho apresenta duas técnicas de análise preditiva: **análise de vibração** e **análise de espectro de corrente (MCSA)**, com propósito de proporcionar a comparação entre tais técnicas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é proporcionar conhecimento maior entre as análises de vibração e análise de espectro de corrente utilizadas no diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução, com a finalidade de demonstrar a capacidade dessas técnicas em identificar operação das máquinas rotativas elétricas com presença de defeito.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho destacam-se:

- Montar uma bancada composta por um motor de indução e simular suas falhas elétricas.
- Utilizar os métodos de análise de vibração e análise de espectro de corrente (MCSA) para identificar as falhas introduzidas e, assim;

- Comparar os resultados das análises utilizando equipamentos como CSI 2120 e software para identificação do defeito em cada um dos métodos propostos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO:

O trabalho apresentado está dividido em 7 capítulos, dos quais:

No Capítulo 1 são apresentadas a Introdução, justificativa e objetivos gerais a respeito do tema escolhido.

No Capítulo 2 é feito uma breve fundamentação teórica da máquina indução trifásica.

No Capítulo 3 é apresentado os conceitos básicos referentes ao método de análise de vibração e análise do espectro de corrente (MCSA) para diagnóstico de falhas elétricas motores de indução trifásicos.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos, abordando a composição da bancada de teste, coletor e software utilizados para obtenção dos resultados práticos do estudo proposto.

Já no Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais e o comparativo entre os métodos propostos a respeito das falhas elétricas encontradas.

No Capítulo 6 são feitas as considerações finais referente às análises realizadas.

No Capítulo 7 é apresentada as referencias utilizadas no presente trabalho.

2. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O trabalho apresentado destaca a técnica de análise de vibração e a análise de espectro de corrente para diagnósticos de possíveis falhas elétricas em motores de indução trifásicos. Sendo assim, se faz necessário uma breve contextualização a respeito do funcionamento e das características construtivas da máquina que será o foco deste estudo.

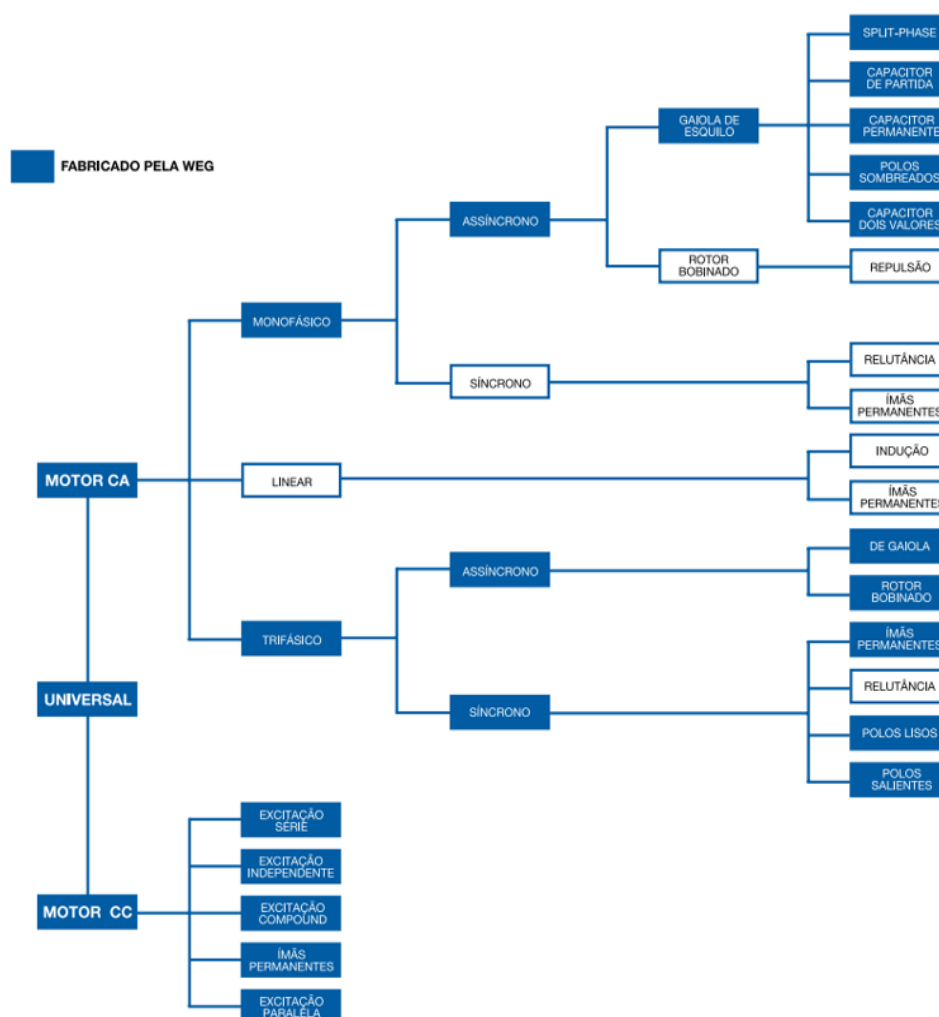
É comum ter motores elétricos desempenhando função de acionadores de outras máquinas como bombas hidráulicas, compressores de ar e ventiladores, no geral seu propósito é a conversão da energia elétrica em energia mecânica. Este tipo de equipamento comumente opera em ambientes com excesso de umidade, com grandes variações de temperatura, com presença de fluídos corrosivos e muitas vezes em ambientes não protegidos do tempo.

Segundo divulgado pela revista digital Valor Econômico (2019), o Brasil possui cerca de 20 milhões de motores industriais, com tempo de vida útil de, aproximadamente, 17 anos, sendo que um a cada dez, pode ter seu tempo de vida útil prolongado até os 40 anos. Baseada nessa informação e sabendo-se que os motores necessitam de cuidados, o plano de manutenção para este tipo de equipamento é extremamente relevante para garantir seu rendimento e a produtividade do processo que precisa de acionamento, via motores elétricos.

As indústrias sempre prezam por diminuir gastos, reduzir custos de sua operação e manter seus equipamentos com ótimo rendimento operacional, portanto, a manutenção preditiva é a principal ferramenta que possibilita o alcance deste objetivo. Conforme listado por Ferreira, C. (2019), existem várias técnicas empregadas na manutenção preditiva, tais como: a análise de óleo lubrificante; análise de ruídos; análise do estado das superfícies; análise estrutural; análise de vibração; análise térmica, análise de espectro de corrente – MCSA; entre outras técnicas.

Grande parte do parque industrial é composto por motores elétricos, tanto de corrente contínua quanto de alternada, e são extremamente significativos para o funcionamento dos processos industriais. Para se ter uma ideia de sua importância, aproximadamente 26% da energia gerada brasileira é utilizada por máquinas elétricas industriais. (Valor Econômico, 2019). Na figura 5 é apresentado um diagrama com os tipos de motores mais utilizados.

Figura 5 – Diagrama com especificações dos motores elétricos



Fonte: Adaptado de Guia de especificação - motores elétricos WEG, 2021.

2.1 Aspectos construtivos

O motor de indução trifásico (MIT), será foco do estudo elaborado, é constituído basicamente por duas partes: estator e rotor.

O estator é composto por três elementos:

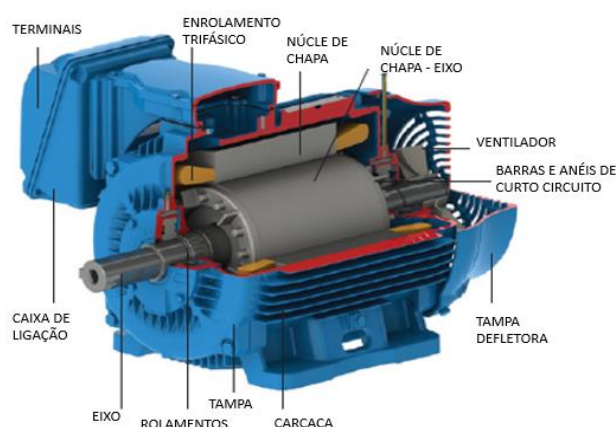
- Carcaça: estrutura composta por ferro fundido, aço ou alumínio e resistente a corrosão. Tem como principal função servir de suporte para as partes fixas e móveis do motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas fixas ao estator.
- Enrolamentos: localizado sobre o núcleo e ligado a fonte de energia elétrica, são constituídos de material condutor isolado.

O rotor é composto por quatro elementos:

- Eixo: transmite a potência mecânica gerada pelo motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas fixas no eixo.
- Barras e anéis de curto-circuito (motor de gaiola): constituído de alumínio injetado sob pressão numa única peça.
- Enrolamentos (motor com rotor bobinado): composto por material condutor e localizado sobre o núcleo

Outras partes que compõem o motor de indução trifásico são: ventilador, tampa defletora, terminais, caixa de ligação, rolamentos e tampa. Na figura 6 está ilustrado um motor em corte com seus principais componentes identificados.

Figura 6 – Motor de indução trifásico em corte



Fonte: Adaptado de Guia de especificação - motores elétricos WEG, 2021.

2.2 Princípio de funcionamento

O funcionamento do MIT se baseia na existência de um campo magnético rotativo, ou campo girante. O campo girante é proveniente da aplicação de uma fonte externa de tensão alternada ao estator, que, por sua vez, produz um campo magnético rotativo que atravessa os condutores do rotor. (Marques, 2016).

Conforme descrito no Guia de Especificação - Motores Elétricos da WEG (2021), o efeito de giro mecânico no eixo do motor se dá pela interação do campo girante do estator (possui intensidade constante) com o campo magnético do rotor, oposto ao campo girante do estator. Como os campos opostos se atraem e se tem um campo rotativo que é do estator, o rotor tende a acompanhar a rotação. Consequentemente, há a produção de um conjugado do motor que faz com que ocorra a rotação da máquina. Desta forma, conforme Marques (2016), “Admite-se que o torque em um motor de indução depende diretamente da diferença de velocidade entre o campo do estator e o giro do rotor.”

Na obra de S.J. Chapman (2013), a velocidade síncrona (N_s) é a velocidade do campo de estator em rpm (rotações por minuto) da máquina, e pode ser expressa em relação à frequência da rede na qual o motor está conectado através da Equação 2.1:

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (rot/min) \quad 2.1$$

Em que:

N_s : Velocidade síncrona

f : Frequência de tensão da rede

P : Número de polos no estator

As correntes que circulam no estator, resultado da tensão aplicada no mesmo, produzem um campo magnético $\mathbf{B}_s$ que gira no sentido anti-horário. Esse campo passa pelas barras do rotor, induzindo uma tensão (e_{ind}) que pode ser observado na Figura 7 (a), e expressa pela Equação 2.2.

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad 2.2$$

Em que:

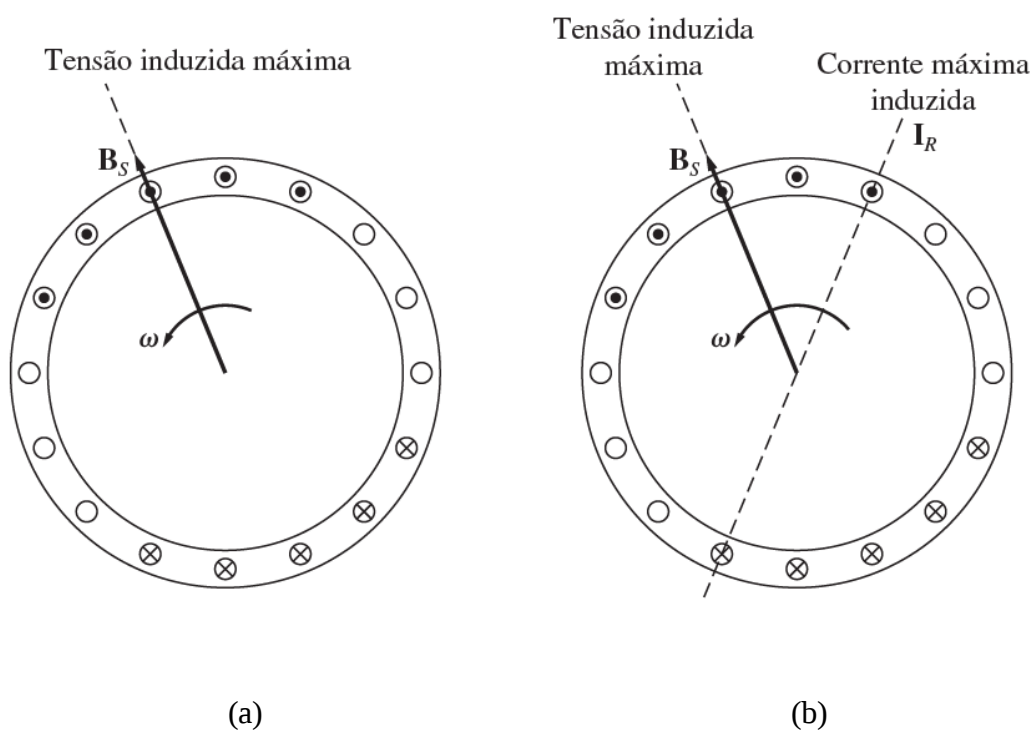
$\mathbf{v}$ = velocidade da barra em relação ao campo magnético

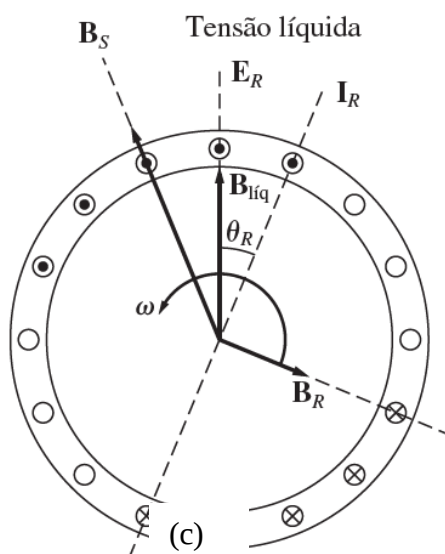
$\mathbf{B}$ = vetor densidade de fluxo magnético

l = comprimento do condutor dentro do campo magnético

A corrente do rotor conduz I_R induz um campo magnético B_R que está atrasado 90° em relação à tensão induzida devido a indutância do rotor, representado na Figura 7 (b). Este campo B_R apresenta interação com B_{liq} o que, conseqüentemente, produz um conjugado anti-horário no motor de indução, (Chapman, 2013).

Figura 7 – (a) Tensão Induzida Máxima. (b) Tensão e corrente máxima Induzida.. (c) Tensão Líquida.





Fonte: CHAPMAN, Stephen J., 2013.

A velocidade síncrona pode ser expressa como frequência de rotação síncrona, conforme a Equação 2.3:

$$f_s = \frac{f \times 2}{p} \quad (\text{Hz}) \quad 2.3$$

O número de polos será sempre par, pois assim é possível formar os pares de polos. Na tabela 1 estão ilustradas as velocidades síncronas mais usuais, levando-se em consideração a frequência padrão de 60 Hz do sistema elétrico no Brasil e os números de polos.

Tabela 1. Velocidades Síncronas.

Número De Polos	Rotação Por Minuto (rpm)
2	3600
4	1800
6	1200
8	900
10	720

Fonte: Adaptado de Guia de especificação - motores elétricos WEG, 2021.

Outra grandeza importante do motor de indução é o escorregamento do rotor (s), que é definido por Umans (2014) como a diferença entre a velocidade síncrona (N_s) e assíncrona (n), ambas dadas em rpm (mais comum) ou rad/s. O escorregamento é expresso pela Equação 2.4:

$$s = \frac{N_s - n}{N_s} \quad 2.4$$

A velocidade do rotor (n) também pode ser expressa levando-se em consideração o escorregamento e a velocidade síncrona, conforme a Equação 2.5:

$$n = (1 - s) N_s \quad 2.5$$

O escorregamento pode ser calculado também em sua forma unitária, adimensional conforme expresso pela Equação 2.6. Almeida, M. T. (1996).

$$S_{unit.} = \frac{s}{F_{rot.sinc}} \quad 2.6$$

Com a velocidade nominal do motor (n) dividido pela frequência de rede é possível obter a Equação 2.7 que demonstra a frequência de rotação da máquina (Fr).

$$Fr = \frac{n}{f} \text{ (Hz)} \quad 2.7$$

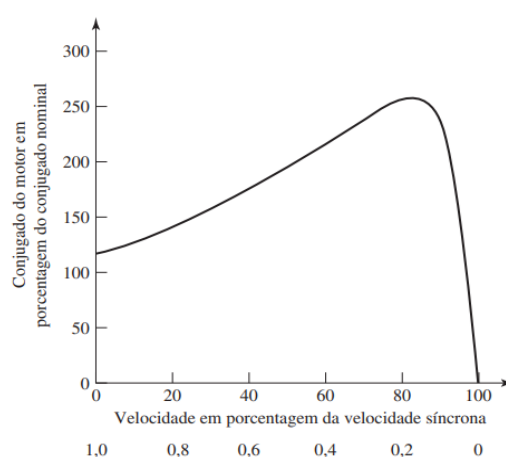
Conforme (Umans, 2014), “*como os campos do estator e do rotor giram cada um sincronicamente, eles estão estacionários entre si, produzindo um conjugado constante que assim mantém a rotação do rotor*”. Desta forma, o MIT possui um conjugado mecânico a qualquer velocidade n do rotor que não seja igual à velocidade síncrona. O conjugado, também definido como torque, pode ser expresso pela equação 2.8.

$$T = -K \times I_r \times \sin \delta_r \quad 2.8$$

A variável K corresponde a uma característica construtiva do motor, I_r é a corrente induzida no rotor e δr é o ângulo que indica o grau de adiantamento entre a onda da força magnetomotriz (FMM) do rotor em relação à FMM do entreferro.

Quando se tem um motor de indução trifásico operando com tensão e frequência constantes, ou seja, em regime permanente, é possível observar o comportamento do conjugado x velocidade síncrona da máquina, conforme apresentado na Figura 8.

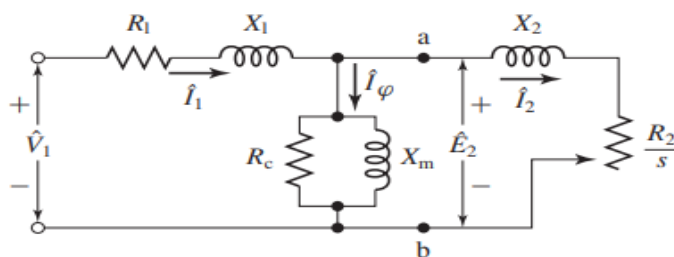
Figura 8 – Conjugado x velocidade do motor de indução trifásico.



Fonte: Umans, Stephen D., 2014.

Destaca-se a importância do conhecimento referente ao circuito equivalente do motor de indução, apresentado na Figura 9. O circuito pode ser utilizado para análise de funcionamento e determinar diversas características relacionadas ao desempenho da máquina de indução em regime permanente. Através dele é possível concluir que ao se manter a tensão no estator, a corrente do estator ($\hat{I}_1$) será alterada (modulada) se houver variação em qualquer impedância do circuito. Dentre essas características tem-se a variação da corrente, velocidade e perdas quando houver variação de carga (conjugado) (Umans, 2014).

Figura 9 – Circuito simplificado (monofásico) do motor de indução.



Fonte: Umans, Stephen D., 2014.

Em que:

V_1 = Tensão de fase de terminal do estator

E_2 = Tensão induzida no rotor (na frequência F_1)

$\hat{I}_1$ = Corrente do estator

R_1 = Resistência efetiva do estator

X_1 = Reatância de dispersão do estator

$\hat{I}_\phi$ = Corrente de excitação do fluxo resultante no entreferro

R_C = Resistência de perdas no núcleo

X_m = Reatância de magnetização

$\hat{I}_2$ = Corrente de carga no rotor, que produz a FMM do entreferro

$\frac{R_2}{s}$ = Resistência do rotor, em função da carga mecânica/escorregamento

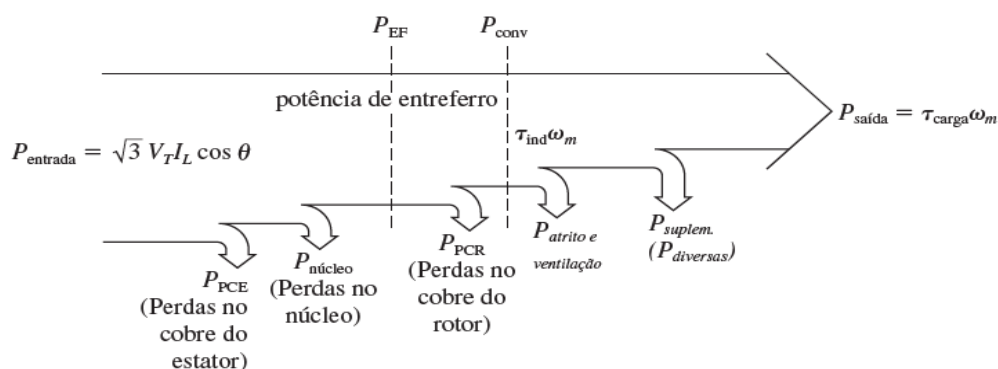
X_2 = Reatância de dispersão do rotor

De acordo com S.J. Chapman (2013, p. 321):

“Um motor de indução pode ser descrito basicamente como um transformador rotativo. Sua entrada é um sistema trifásico de tensões e correntes. Em um transformador comum, a saída é uma potência elétrica presente nos enrolamentos do secundário. Em um motor de indução comum, os enrolamentos do secundário (rotor) estão em curto-circuito, de modo que não há saída elétrica. Em vez disso, a saída é mecânica.” SJ Chapman (2013, p. 321).

A relação entre a potência elétrica que é fornecida pela fonte elétrica e a potência mecânica de saída pode ser observada através do diagrama de fluxo de potência da Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de fluxo de potência do motor de indução

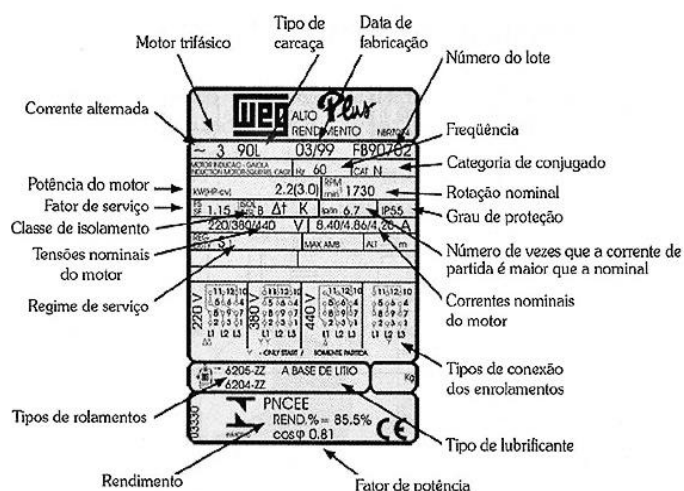


Fonte: Chapman, Stephen J., 2013.

P_{entrada} é a potência de entrada da máquina, composta pela tensão e corrente trifásicas fornecidas pela fonte que fornece energia ao MIT. Após a potência inicial de entrada, o motor vai sofrendo perdas que são referentes a perdas no cobre que compõem o estator (P_{PCE}), perda por histerese e corrente parasita no estator ($P_{\text{núcleo}}$), perdas no cobre do rotor (P_{PCR}). Após passar por essas perdas tem-se a P_{conv} que é a potência que será convertida em energia mecânica e através dela haverá ainda as perdas por ventilação e atrito, devido a rotação da máquina. Assim, $P_{\text{saída}}$ é a potência restante que se tem na saída ou eixo do motor, S.J. Chapman, (2013).

Outro item relevante nos motores de indução é a sua placa de identificação, Figura 11. É nela que aparecerá dados da máquina como características construtivas, desempenho determinadas pela NBR-7094 (WEG, 2016). Informações como tensão, corrente nominal, temperatura nominal máxima que pode ser exposto o equipamento, tipo de esquema de ligação para tensão nominal, etc.; são expressos na placa de identificação do motor.

Figura 11 – Exemplo de placa de identificação de motor elétrico.



Fonte: Guia de especificação - motores elétricos WEG, 2021.

2.3 Tipos de falhas elétricas dos motores de indução

As falhas do MIT como já citado anteriormente, podem ter origem mecânica ou elétrica. Com foco na falha elétrica, pode-se concluir, em sua maioria, serem provocadas por: descargas

parciais, degradação térmica, resistência de contato, magnetização eletromagnética, aquecimento elétrico e indução eletromagnética. (Pinheiro, 2011).

Conforme apresentado por Ribeiro (2016), é possível citar alguns tipos de falhas de origem elétrica, como:

- Curto-circuito na bobina do rotor;
- Curto-circuito nos enrolamentos de fase do estator;
- Barras do rotor trincadas (quebradas);
- Super aquecimento do motor;
- Falha de isolamento nos enrolamentos;
- Folgas irregulares no entreferro;
- Fuga de corrente para os mancais;

A falha, independente da origem (elétrica ou mecânica), pode ainda ocorrer de forma isolada ou em combinação com duas ou mais tipos de falhas, ocasionando sérias consequências no motor, tais como: tensões e correntes desbalanceadas; aumento de vibrações; queda do torque médio; aumento das perdas que reduzem o rendimento do equipamento; aumento de temperatura expressivos. (Pinheiro, 2011).

No próximo capítulo, serão abordadas técnicas preditivas que auxiliam na detecção de falhas elétricas no motor de indução, conforme relacionado até o momento.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISES PREDITIVAS

A manutenção preditiva se destaca como uma ferramenta de grande importância dentro das indústrias devido ao fato de proporcionar prolongamento de vida útil dos equipamentos, aumento de rendimento da produção, redução de gastos com manutenções desnecessárias, entre outros benefícios. (G.M.A. Júnior, M.A. Debossam, RV Perpétuo, et al., 2017).

Em seu estudo, Oliveira Filho (2017) aponta as principais técnicas para detecção de falhas em um motor de indução:

- Análise de vibração - Técnica que permite um diagnóstico das falhas elétricas e mecânicas através da vibração que o motor apresenta.
- Análise de assinatura de corrente do motor (MCSA) - Técnica que utiliza a corrente demandada pelo MIT durante o seu funcionamento.
- Análise termográfica - Verifica anomalias no funcionamento do equipamento através do mapeamento termográfico do motor.
- Resistência de isolamento - Utiliza o megômetro (MEGGER) para medir a resistência de isolamento de máquinas, como motores e transformadores.

Na tabela 2 está apresentado, de forma sucinta, um quadro composto dos diversos tipos de manutenções preditivas presentes no mercado atualmente para motores elétricos e como atuam para diagnóstico das falhas.

É possível observar, através do quadro da Tabela 2, a abrangência das técnicas MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) e da análise de vibração para um programa de manutenção com obtenção da redução de custos operacionais e aumento da confiabilidade da produção.

Tabela 2 – Quadro com resumo de técnicas de manutenção preditiva em motores elétricos

Técnicas	Tipo Motor		Condição		Modos de Falha									
	Média Tensão	Baixa Tensão	On-line	Off-line	Descargas Parciais	Curto entre espiras	Vibração	Barra Quebradas	Desbalanço de Tensão	Mau Contato Conexões	Isolação	Excentricidade Entreferro	Envelhecimento Térmico	Sobrecarga
Análise de Vibração	X	X	X				X	X				X		
Assinatura de Corrente	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X		X
Descargas Parciais	X		X	X	X						X			
Fluxo Magnético	X		X			X	X	X	X		X	X		X
FP da Isolação	X	X		X							X			
Impedância	X	X		X		X				X	X	X	X	
Isolamento Off-line	X	X		X							X			
MCA	X	X				X		X	X	X	X	X		
Medição Tensão e Corrente	X	X	X						X	X				X
Nº Partidas Repetidas	X	X	X										X	X
R. Isolamento	X	X		X							X			
R. Ôhmica	X	X		X		X				X				
Temperatura	X	X	X						X				X	X
Tensão Aplicada	X			X							X			
Termografia			X							X			X	X
Teste de Impulso	X	X		X		X					X			
Ultra-som	X	X	X		X		X	X			X	X		

Fonte: Adaptado de Oliveira Filho, Francisco das Chagas de., 2017.

A seguir, serão detalhadas as duas técnicas preditivas utilizadas nesse trabalho: Análise de Vibração e MCSA.

3.1 Análise de vibração

Uma das principais técnicas da manutenção preditiva é a análise de vibração. Ela é fundamental para diagnosticar desbalanceamento, excentricidade de eixo, rolamentos danificados, falhas nas engrenagens, eixos empenados, cavitação em bombas e desbalanceamento magnético em motores elétricos. A vibração não pode ser percebida visualmente, ou seja, é quantificada apenas por meio de equipamentos específicos que são capazes de confirmar e identificar de forma precisa os resultados da vibração coletados no equipamento (Nepomuceno, 1989).

Sendo assim este tipo de análise detecta alterações no funcionamento de equipamentos rotativos, incluindo motores elétricos. As vibrações são essenciais para muitos equipamentos, são previstas em projeto para ocorrer de forma regular, porém quando se detecta anormalidade na vibração durante a operação, é possível intervir na máquina antes que a mesma venha entrar em falha de fato. (Marques e Brito, 2019).

Os motores elétricos, assim como qualquer máquina rotativa, emitem vibrações que podem ser captadas por equipamentos que detectam sua frequência. Ao realizar uma coleta por meio de transdutores conectados na carcaça do motor, os dados coletados são analisados através

de um software que possibilita a visualização do espectro de frequência do sinal obtido e, portanto, é possível classificar a criticidade da vibração usando conhecimento técnico ou seguindo parâmetros determinados por normas regulamentadoras (Junior *et al.*, 2017).

A vibração detectada e não solucionada através de intervenção (de forma a corrigi-la), pode causar:

- Desgaste prematuro dos componentes.
- Quebras inesperadas, que impactam o processo de produção.
- Aumento de custo na manutenção, pois haverá necessidade de uso de peças não planejadas para reposição dos itens avariados.
- Perdas de energia.
- Baixa qualidade da produção
- Redução de rendimento do motor

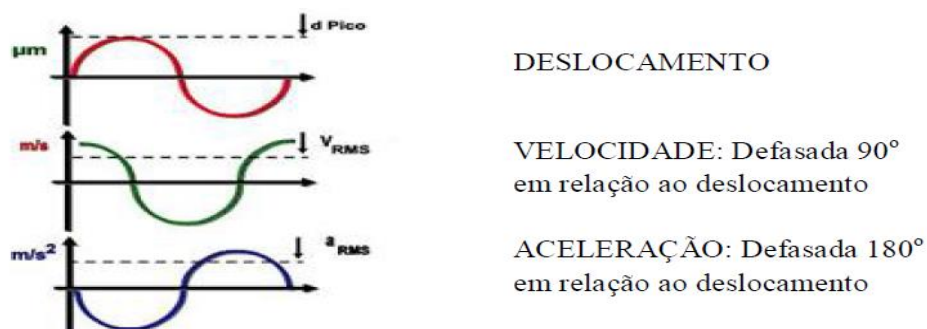
O motor de indução apresenta um fator de potência ou potência útil que relaciona o quanto de energia elétrica consumida é transformada em energia mecânica. Este fator é influenciado por algumas variáveis do motor que geram perdas: a vibração é uma delas, pois ao se ter uma perturbação não prevista em projeto, ocorre uma dissipação de energia que compromete o rendimento da máquina (Ferreira C., 2019). Portanto, a necessidade de eliminação da vibração anormal no equipamento é uma forma de se manter o alto rendimento e sem desperdício da energia aplicada.

Da Silva (2019) define a vibração como fenômeno oscilatório de um determinado corpo em relação a um ponto de referência provocado pela aplicação de uma força. Qualquer movimento que ocorre repetidas vezes em um período é definido pelo autor como vibração. Este movimento é diferente para cada tipo de máquina, com amplitude de força e determinada frequência.

A medição da vibração é realizada por parâmetros como deslocamento, velocidade ou aceleração. Todos esses três representam "o quanto" o dispositivo vibra, Conceição (2012).

Os níveis de vibração são, usualmente, mensurados de acordo com sua amplitude em função do tempo e podem ser expressos em deslocamento, velocidade e aceleração (S.M.S. Holanda, 2016), conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação da defasagem dos parâmetros de vibração - Forma de onda.

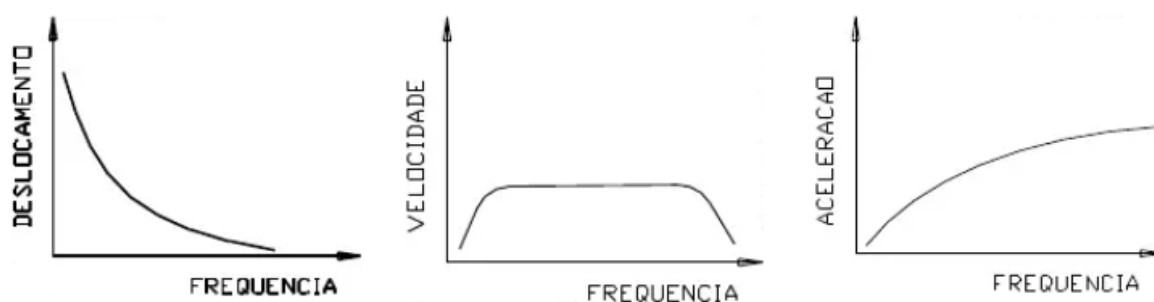


Fonte: Holanda, Sandra Maria Santos.,2016.

Independentemente da grandeza selecionada, a forma e o período da vibração permanecem semelhantes, todavia conforme ilustrado na Figura 12, o que muda é a diferença de fases entre elas. De acordo com Holanda (2016), os parâmetros são medidos em unidades métricas em conformidade com a norma ISO 10816, a qual a norma antiga ISO 2372.

Conforme definido por Bandeira, Abreu E. Gianelli (2010, p.7): “*A amplitude relaciona-se com a quantidade de energia contida no sinal vibratório mostrando-nos a criticidade e destrutividade dos eventos presentes.*” Os gráficos contidos na Figura 13 ilustram os níveis de vibração em função da frequência. Assim como na Figura 12, esta figura representa os mesmos fenômenos físicos. Na prática existem defeitos que serão mais visíveis em função do tempo e outros que serão mais fáceis de identificar em função da frequência; ou seja, em ambos os casos se tratam de um gráfico de dois eixos, onde no eixo Y é expresso a amplitude da vibração.

Figura 13 – Amplitude em função da frequência tomada em deslocamento, velocidade e aceleração - Espectro



Fonte: Bandeira, G.; Abreu, G.; Gianelli, R.,2010.

Tabela 3 – Unidades de medida da amplitude no sistema métrico

AMPLITUDE	SISTEMA MÉTRICO
Deslocamento	Micrometros (μm)
Velocidade	Milímetros por segundo (mm/s)
Aceleração	Milímetros por segundo ao quadrado (mm/s ²) / aceleração da gravidade (g)

Fonte: Adaptado de Rossdeutscher Junior, Joe Luiza, 2018.

De acordo com Holanda (2016):

- ✓ **Deslocamento:** é o parâmetro que representa as componentes com baixa frequência; é indicado para medições com frequências menores que 10 Hz.
- ✓ **Velocidade:** é o parâmetro da vibração para componentes entre alta e baixa frequência; ou seja, parâmetros que são normalmente escolhidos para avaliação da severidade estão entre 10 Hz e 1000 Hz.
- ✓ **Aceleração:** é o parâmetro que melhor demonstra as componentes de alta frequência, sua aplicação é recomendada para frequências de defeito entre 1.000 Hz e 10.000 Hz. É normalmente utilizada para monitoramento de rolamentos, engrenamentos, pulsação de pressão em compressores rotativos.

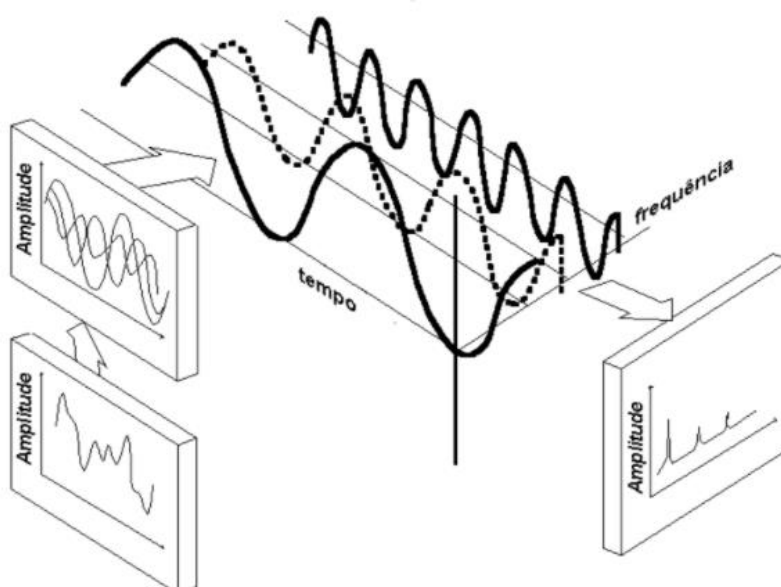
Em seu estudo Ribeiro (2016) indica três variáveis fundamentais para a análise de vibração e explica a sua aplicação para análise de vibração:

- Amplitude (A): está associada a quantidade de energia contida no sinal vibratório. É fundamental para definição do grau de severidade da vibração. Segundo Holanda (2016), “*pode ser definido como a intensidade que acontece um determinado evento mostrando a criticidade e a destrutividade dos eventos presentes.*”
- Frequência (f): é a quantidade de vezes, em que um fenômeno se repete durante um período de tempo.

- Fase (θ): é o ângulo inicial do argumento da função senoidal que descreve o movimento harmônico. Indica o avanço ou atraso de um sinal. A vibração é sempre atrasada em relação à oscilação.

A amplitude da vibração pode ser observada em dois métodos: domínio das frequências e do tempo. Segundo Rossdeutscher Junior (2018), o sinal observado tanto no domínio das frequências tanto no domínio do tempo é o mesmo, o que muda é o ponto de vista. O que se determina qual utilizar é a característica do sinal que se pretende analisar. Na Figura 14 é possível observar, de forma clara, o sinal da vibração através do domínio da frequência e do tempo, posicionadas a 90° uma da outra.

Figura 14 – Representação gráfica do domínio da frequência e do tempo



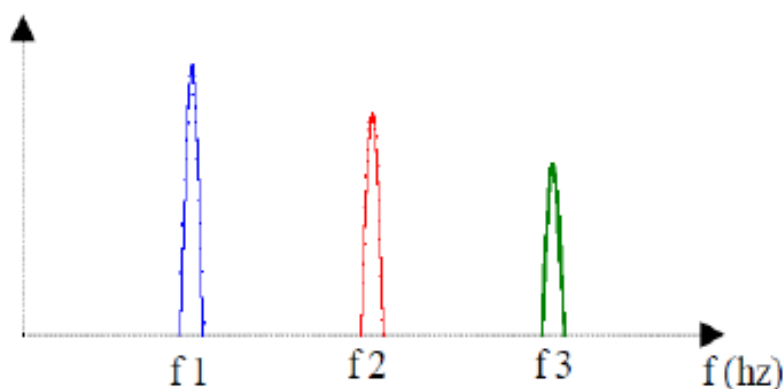
Fonte: Emerson, Process Management., 2006.

A análise de vibração no domínio da frequência é a técnica mais viável na detecção das falhas, devido a facilidade que se tem para encontrar a origem do defeito. A sua representação se dá por meio de espectros que possuem amostras de picos, que permitem a observação individual de cada amplitude da vibração coletada. Trata-se de uma técnica que deixa claro os defeitos que estão ocorrendo na máquina e em qual componente. (HOLANDA, 2016)

Cada componente da máquina gera sua própria assinatura de vibração “**característica**”. Essas frequências são somadas juntas para compor o sinal de domínio de tempo. Contudo, para separar os sinais misturados coletados é utilizado a FFT (Transformada de Fourier).

A Transformada de Fourier é um processo matemático que possibilita transformar a forma de onda em um espectro, conforme apresentado na Figura 15. É usual a utilização do sinal no domínio da frequência para obtenção do diagnóstico da falha.

Figura 15 – Sinais no domínio da frequência.

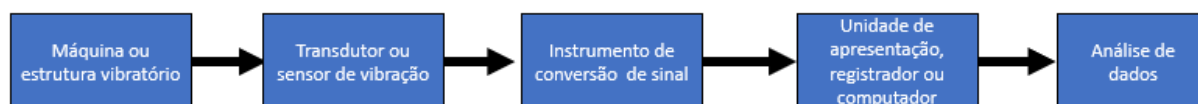


Fonte: Holanda, Sandra Maria Santos, 2016.

3.1.1 Coleta de Dados

Para a aplicação da técnica de análise vibração é necessário reunir dados para que seja possível obter os sinais de vibração para o diagnóstico da falha. Na Figura 16 está ilustrado o sistema básico de aquisição de dados para análise.

Figura 16 – Sistema básico para medição de vibração

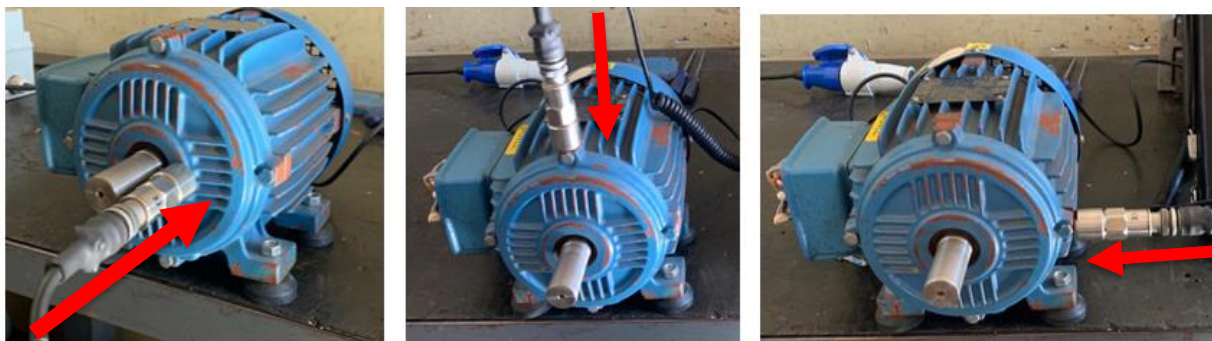


Fonte: Adaptado de Menezes, Prisco Araújo, 2015.

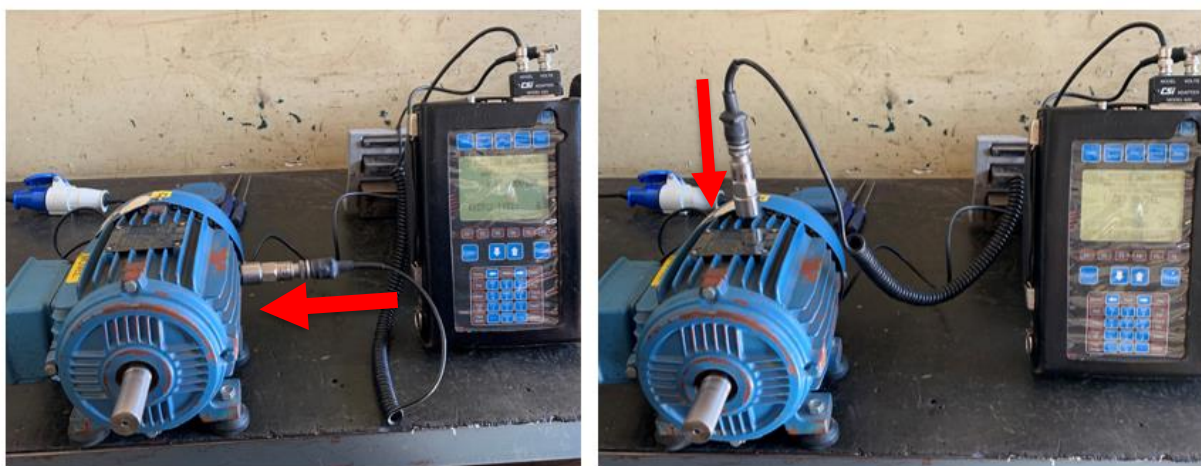
A NBR 10082 é a norma que traz informações a respeito das precauções para garantir que os transdutores utilizados na obtenção do sinal estejam posicionados corretamente no equipamento, pois a aferição da vibração de forma errada pode interferir no diagnóstico mais preciso. (Júnior, Geraldo M. A., *et al.*, 2017). A norma indica pontos de medições obrigatórios conforme estão ilustrados nas Figura 17 (a) transdutor posicionado no lado de acionamento do motor (LA) no

sentido axial, vertical e horizontal e (b) transdutor posicionado no sentido oposto ao acionamento (LOA), no sentido horizontal e vertical. Na Figura 18 está ilustrado os pontos recomendados e não recomendado segundo a ABNT NBR 10082

Figura 17 – Pontos de medição lado do acionamento da máquina (LA) definidos de acordo com o item 4.2 da norma ABNT NBR 10082.



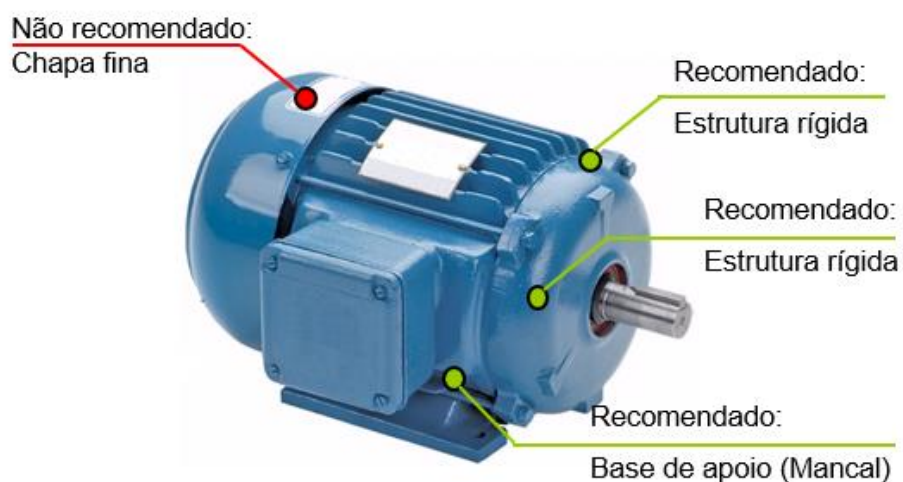
(a)



(b)

Fonte: Autor.

Figura 18 – Pontos recomendados pela norma ABNT NBR 10082.



Fonte: Lamim Filho, P. C. M., Brito, J. N. Pederiva, R., 2003.

“Os transdutores podem ser colocados em qualquer direção angular, na carcaça do mancal ou suporte (pedestal) para a realização das medidas radiais. Preferencialmente nas direções verticais e horizontais, pois é importante que sejam realizadas ao menos duas medições radiais e ortogonais entre si. Além das direções radiais, também é útil tomar uma medição na direção axial.” Júnior, Geraldo M.A. et al., (2017).

O transdutor sísmico utilizado para captação do sinal de vibração do motor é um acelerômetro. A obtenção de sinal com esse sensor possibilita a escolha do parâmetro desejado para medição da vibração, podendo ser aceleração, velocidade ou deslocamento.

Atualmente, existem diversos analisadores no mercado, o equipamento para medição dos sinais de vibração do presente estudo é o CSI 2120, conforme a ilustração da Figura 19. O coletor de vibração é uma ferramenta que permite o monitoramento dos parâmetros obtidos através do transdutor.

Figura 19 – Coletor de vibração analisador CSI 2120.



Fonte: Autor.

Para análise da vibração coletada, tem-se a norma ISO 2372 (de 1976) e a ISO 10816 (de 1998) que é dividida em partes: ISO 10816-1 e ISO 10816-3. A Tabela 4 apresenta os níveis de vibração da ISO 10816-3, a qual se destaca pois estabelece níveis de vibrações aceitáveis para todos os sentidos e posições da coleta, utilizado para que o analista possa ter um valor de referência, a fim de diagnosticar a severidade do sinal obtido na coleta em máquinas. Na Tabela 5 é ilustrado o gráfico da ISO 2372 que propõe a classificação da máquina em quatro grupos (Almeida, M. T., 1996).

Tabela 4 – Níveis de vibração ISO 10816-3 para motores Classe I, II, II e IV

CRITÉRIO PARA JULGAMENTO DO ESTADO DE MÁQUINAS				
Nível de Vibração (mm/s)	até 20CV	de 20CV até 100CV	>100CV Base Rígida	>100CV Base Flexível
0,28	Bom	Bom	Bom	Bom
0,45				
0,71				
1,12	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável
1,8	Atenção			
2,8	Crítico	Atenção	Aceitável	Aceitável
4,5		Crítico	Atenção	Atenção
7,1			Crítico	Crítico
11,2	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico
18				
28				
45				

Fonte: Rossdeutscher Junior, Joe Luiza, 2018.

Tabela 5 – Níveis de vibração ISO 2372 para motores Classe I, II, II e IV

Leitura da Vibração	Escala de Limites de Velocidade Classificação de Equipamentos Norma ISO 2372-1976			
	Equipamentos		Equipamentos Grandes	
	Pequenos	Médios	Suportes Rígidos Classe III	Suportes Flexíveis Classe IV
	Classe I	Classe II		
0,28	Bom	Bom	Bom	Bom
0,45				
0,71				
1,12	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
1,80				
2,80	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
4,50				
7,10				
11,20	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
18,00				
28,00				
45,00	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
71,00				

Fonte: Benedetti, Julinho Alberto, 2002.

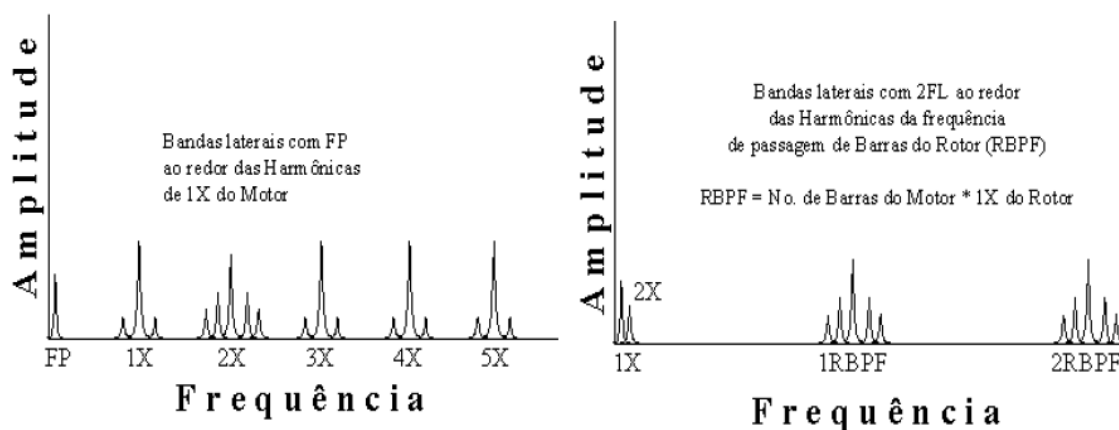
3.1.2 Análise de defeitos com origem elétrica

Para realização da análise de falhas elétricas em motores de indução é necessário o conhecimento de dados fundamentais deste tipo de equipamento, tais como: rotação nominal do motor que aparece como dado de placa (n), velocidade síncrona (N_s), frequências de passagem de ranhuras do rotor (f_r), frequências de escorregamento ($s.f$).

A seguir serão ilustradas e exemplificadas, brevemente, as falhas de origem elétrica típicas encontradas através da análise de vibração:

Anéis em Curto/Barras Trincadas ou Quebradas: Defeito como quebras ou trincas ocasionará vibrações elevadas na velocidade de operação 1X (velocidade nominal em RPM) com bandas laterais iguais à frequência de passagem de polo (FP) ou 2X (duas vezes) a frequência de sincronismo. Já barras do rotor frouxas será indicada com 2X a frequência de rede (120 Hz) em torno da frequência de passagem de barras do rotor (Almeida, M. T., 1996). O espectro pode ser observado na Figura 20.

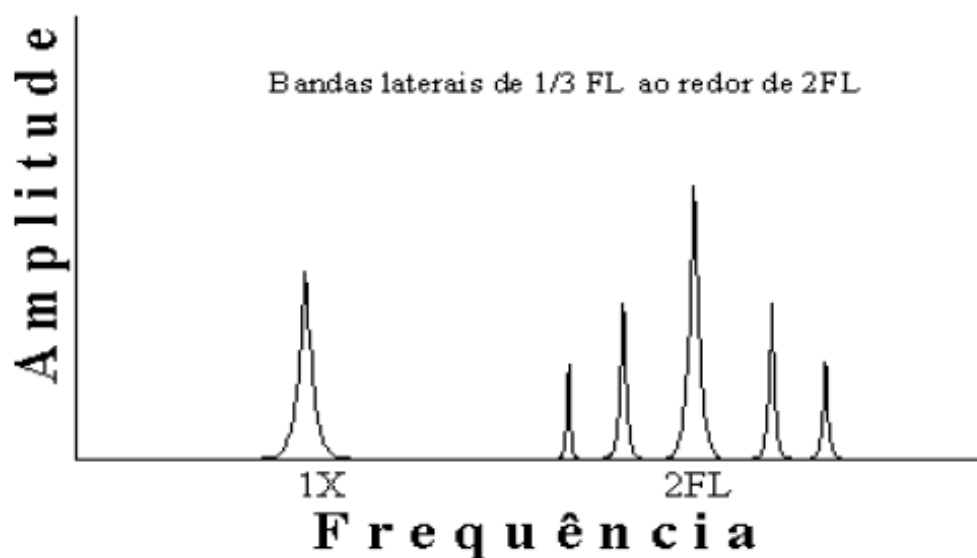
Figura 20 - Anéis em Curto/Barras Trincadas ou Quebradas.



Fonte: Almeida, M. T., 2002.

Conector solto: problemas relacionados à conexão de fases devido a conectores frouxos ou rompidos ocasionam elevadas vibrações em 2X a frequência de rede (2FL) e com presença de bandas laterais distantes 1/3 da FL, (Almeida, M. T., 1996). Para esse fenômeno, o espectro pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Conector solto.

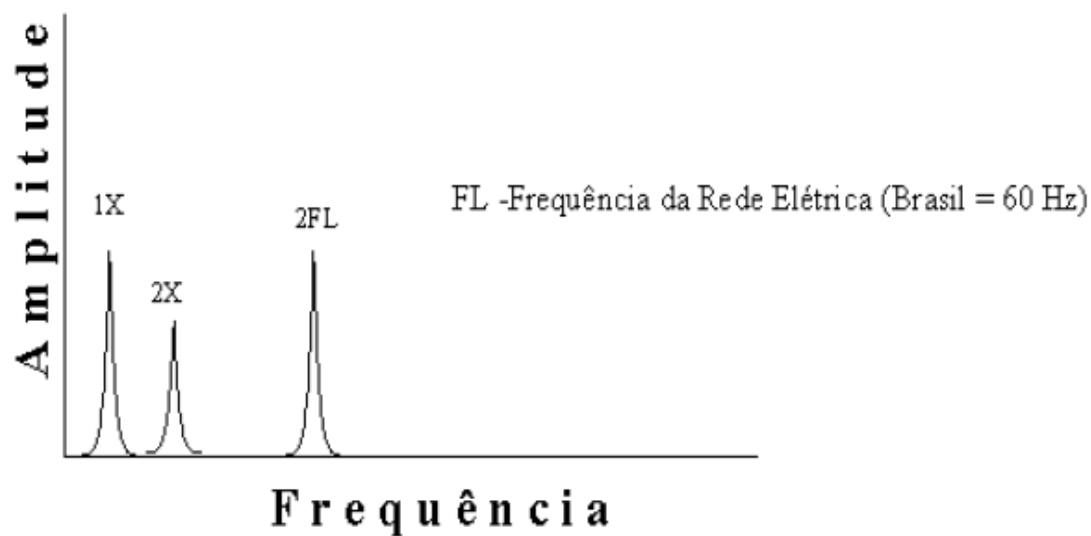


Fonte: Almeida, M. T., 2002.

Nos motores de indução, o entreferro (*gap*) é estreito e distante de forma uniforme de modo que qualquer variação da distância entre o rotor e o estator ocasiona uma grande variação na relutância total do circuito magnético do motor. Se o entreferro (*gap*) é estreitado em alguma parte e afastado em outra do motor, haverá um desequilíbrio de forças. Esse desequilíbrio induzirá vibrações semelhantes aos efeitos de variação de corrente (Almeida, M. T., 1996).

Excentricidade no Estator: defeitos localizados no estator possuem vibrações resultante com uma componente constante e outra alternada em 2x a frequência da rede. As frequências de rotação do rotor e de escorregamento podem provocar modulações em torno de 120 Hz (duas vezes a frequência de rede), (Almeida, M. T., 1996). Esse comportamento pode ser observado na Figura 22.

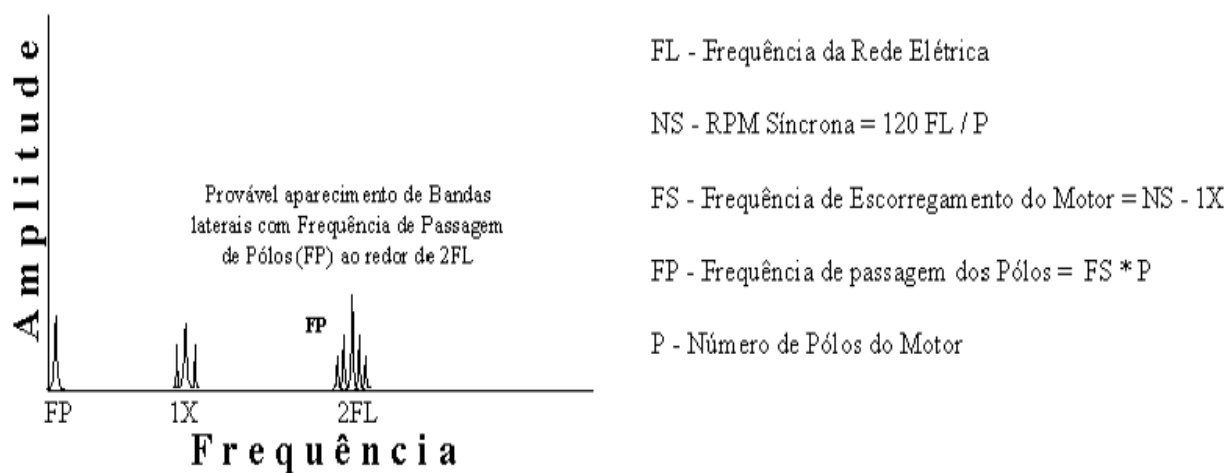
Figura 22 - Excentricidade no Estator.



Fonte: Almeida, M. T., 1996.

Excentricidade no Rotor: o espaçamento indevido do rotor e estator induz uma vibração pulsante entre $2x$ a frequência de rede e com presença de harmônicos nas bandas de passagem dos polos (FP). O espectro pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Excentricidade Rotor.



Fonte: Almeida, M. T., 1996.

3.2 ANÁLISE DE ESPECTRO DE CORRENTE (MCSA)

A análise de espectro de corrente em motores de indução trifásico é uma das técnicas utilizadas para diagnóstico de falhas elétricas. Esta técnica pode diagnosticar falhas como:

- Barras quebradas em rotores;
- Curto-circuito em enrolamentos ou em lâminas;
- Eficiência e carregamento do sistema;
- Problemas no acoplamento e na carga acoplada;
- Problemas nas soldas das bobinas do rotor em motores com anéis;
- Falhas relacionadas ao rotor e estator do motor;

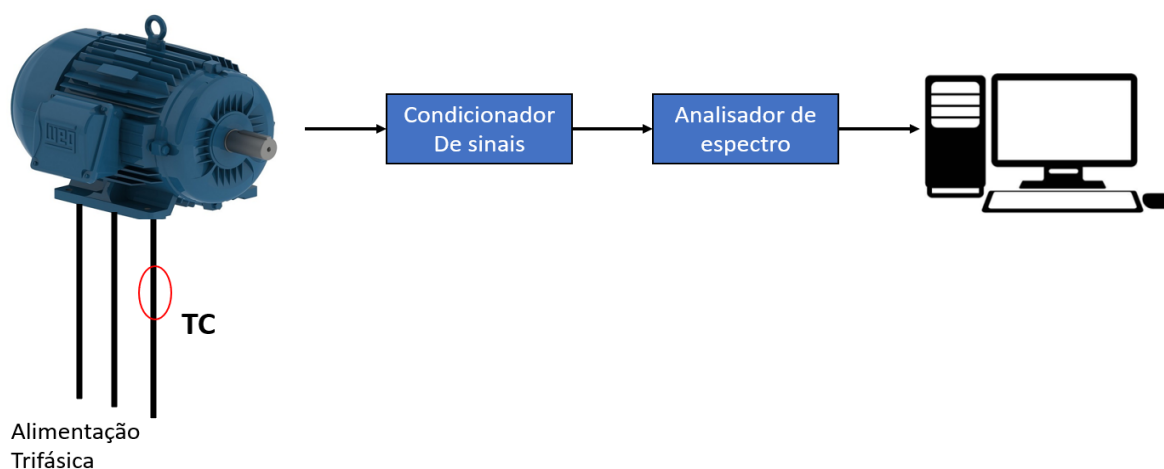
Os resultados mais importantes deste tipo de inspeção em motores de indução é:

- Melhoria na vida útil e maior disponibilidade do equipamento;
- Maior rendimento;
- Maior confiabilidade;
- Redução da manutenção corretiva;

3.2.1 Coleta de Dados

Sua aplicação se baseia na utilização de um alicate amperímetro no circuito de alimentação da máquina (Marques L.F.B., 2016). A medição é realizada em uma fase por vez para produzir o espectro de corrente. O diagnóstico se deve ao fato de analisar a condição magnética elétrica e mecânica diretamente do painel de alimentação do MIT, (El Bonaldi, 2005). Na Figura 24 está demonstrado através do esquema a implementação da técnica MCSA.

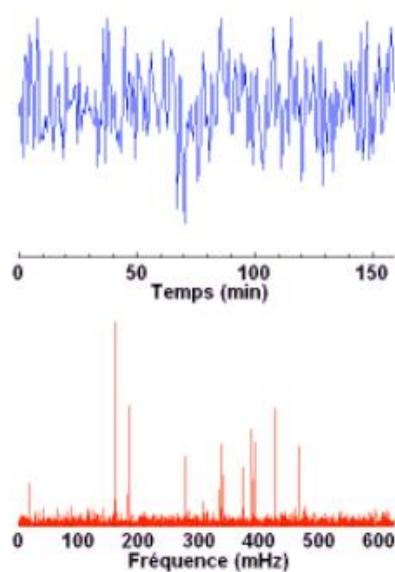
Figura 24 – Sistema básico para análise espectral da corrente.



Fonte: Adaptado de Bonaldi, Erick Leandro, 2006.

O objetivo da técnica é obter a assinatura de corrente do motor para identificar a frequência e magnitude de cada fase que compõem o sinal de corrente da máquina. Ao obter os sinais através do alicate amperímetro, o coletor/analísador geram gráficos no domínio do tempo e no domínio das frequências, através da Transformada de Fourier, Marques (2016). Um exemplo de sinais obtidos, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência está ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Exemplo de sinal no domínio do tempo e domínio da frequência.



Fonte: Marques (2016).

Através dos sinais coletados é possível realizar o diagnóstico da máquina e determinar o estado da mesma. De acordo com Marques (2016), falhas em motores elétricos geram variação na corrente.

3.2.2 Análise de defeitos

A análise de espectro de corrente, diferente da análise de vibração, utiliza como forma de identificação de severidade de falha a escala em dB. Em seu estudo Bonaldi (2006) justifica a necessidade de conversão de valores lineares que são obtidos através do coletor para dB's.

“A razão é muito clara, uma vez que a amplitude da componente fundamental da rede é muito maior que as amplitudes das componentes de falha, fica inviável a comparação entre essas frequências numa escala linear.” (Bonaldi, 2006).

Para converter os valores de sinais lineares para dB é utilizada a Equação 3.1:

$$Valor (dB) = 20x \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad 3.1$$

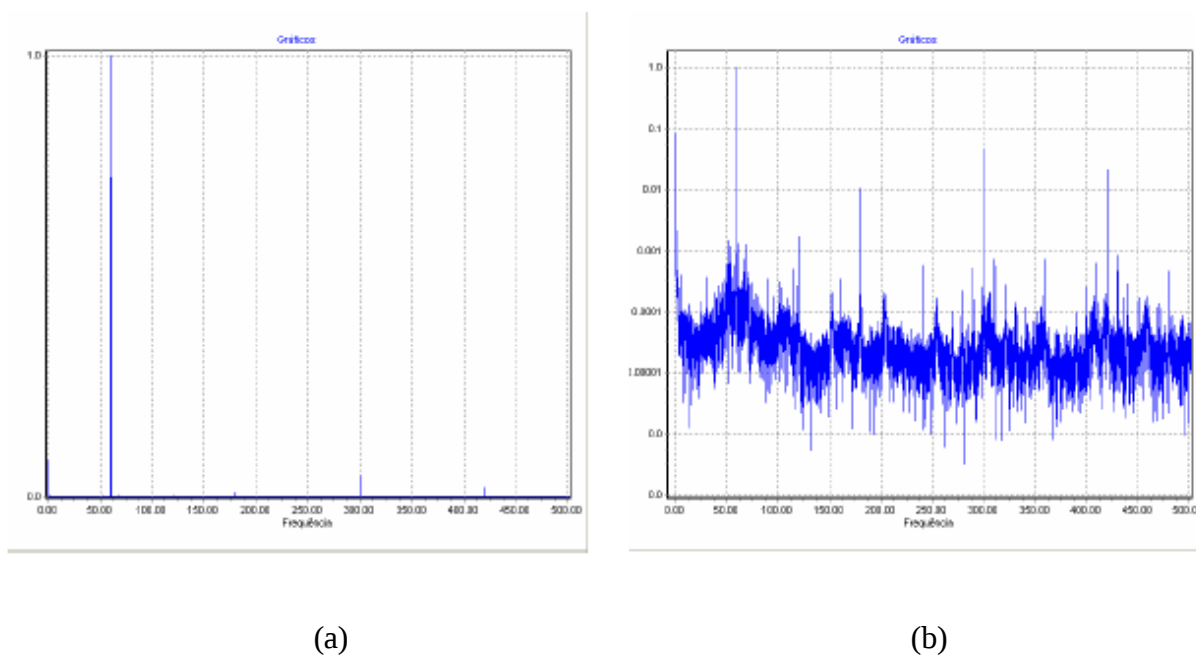
Em que:

P: Amplitude da fundamental;

P₀: Amplitude da componente característica de falha;

Na Figura 26 está ilustrado como é a representação do espectro em escala logarítmica (a) e escala linear. (b). “É nítido que se tem uma visão muito mais abrangente do espectro no segundo caso. O que se justifica o emprego de escalas logarítmicas.” (Bonaldi, 2006).

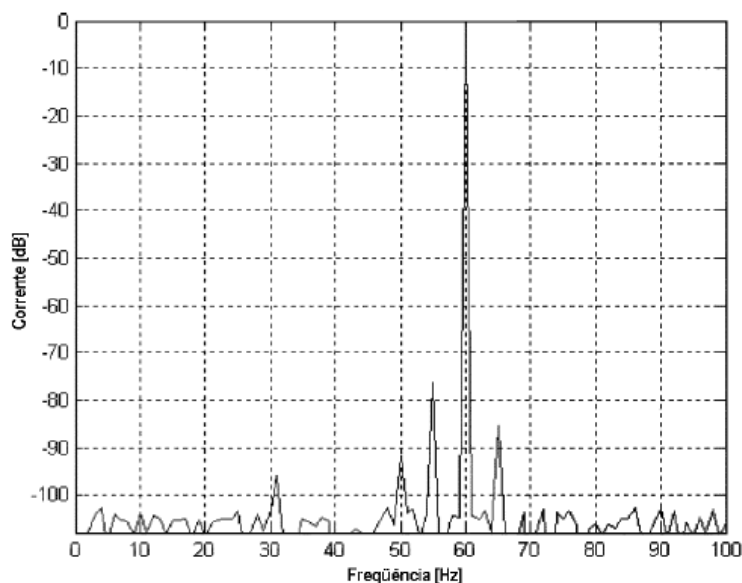
Figura 26 – Exemplo de sinal no domínio do tempo e domínio da frequência.



Fonte: Marques (2016).

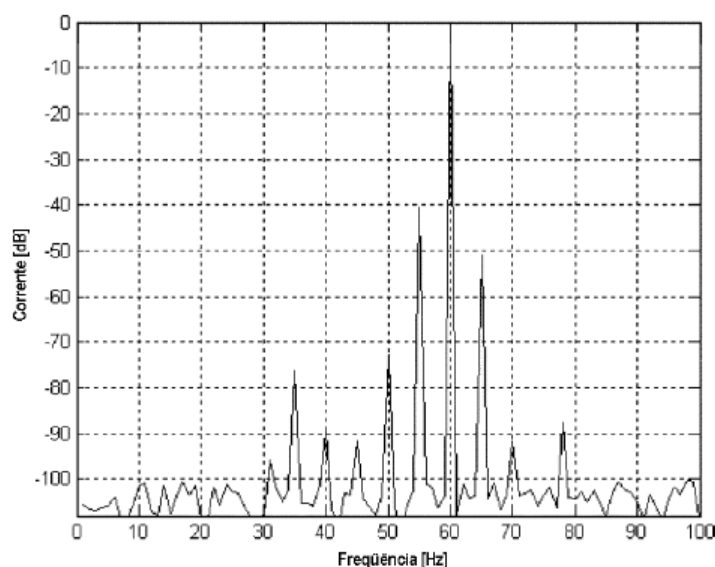
Após a coleta dos dados, as assinaturas de correntes são obtidas através do software que fará a adaptação do sinal. A análise de espectro de corrente é realizada no gráfico do espectro de corrente, com amplitude em decibéis (dB's) (M.M. Wageck, 2015). Na Figura 27 é ilustrado o sinal obtido quando o motor está em boas condições e na Figura 28 é visto o espectro referente a um motor com defeito nas barras do rotor. A seguir serão ilustradas e exemplificadas, brevemente, as falhas típicas encontradas através da análise de espectro de corrente.

Figura 27 – Espectro de corrente típico de um motor de indução em boas condições.



Fonte: Ematsu, Márcio Yoshikazu Et Al., 2008.

Figura 28 – Espectro de corrente típico de um motor de indução com defeito nas barras no rotor.



Fonte: Ematsu, Márcio Yoshikazu Et Al., 2008.

Barras Trincadas ou Quebradas

Defeitos como ilustrado na Figura 29 demonstram situação característica quando há barras quebradas no rotor. É observado no espectro que há duas componentes que se localizam próxima a componente fundamental. É possível realizar o cálculo das componentes de banda

laterais. O cálculo utiliza a frequência de rede (f_l) e as frequências de escorregamento (f_s) (Marques et al., 2016). A quebra de barras no rotor resulta no surgimento de componente no espectro da corrente do estator. Identificado as bandas laterais e assim a frequências de barra quebrada através da Equação 3.2, pode-se classificar o grau de criticidade de acordo com Tabela 5, (Lamin Filho Et Al., 2003).

$$f_l \pm 2f_s \quad 3.2$$

Tabela 5 – Severidade de defeito no rotor e recomendações para diagnóstico de análise de corrente.

A (dB) $f_l \pm 2f_s$	Avaliação da condição	Ação recomendada
> 50	Excelente	Nenhuma
44 a 50	Boa	Nenhuma
39 a 44	Moderada	Continuar inspeção e analisar somente tendências
35 a 39	Desenvolvendo trinca na barra do rotor ou juntas com alta resistência	Reduzir intervalo de inspeção e observar curva de tendência
30 a 35	Provavelmente duas barras trincadas ou quebradas, ou juntas de alta resistência	Fazer análise espectral de vibrações para confirmar a fonte do problema
25 a 30		Desmontar o rotor para inspeção
< 25		Desmontar ou substituir o rotor para inspeção

Fonte: Lamin Filho Et Al., 2003

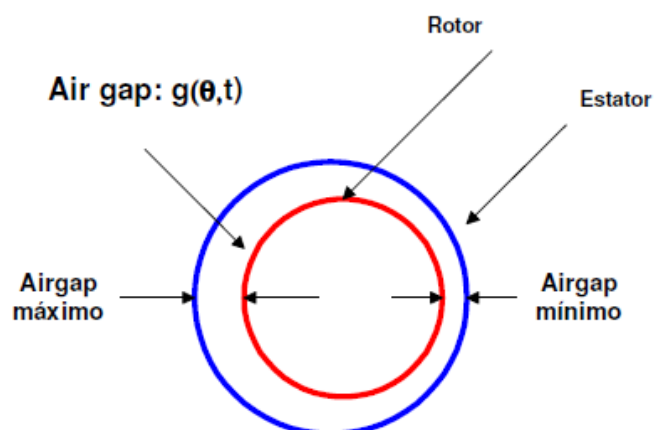
Excentricidade do entreferro (*air gap*)

A excentricidade do entreferro ocorre quando há uma distância entre o rotor e a superfície interna do estator espaçadas de forma desiguais, conforme ilustrado na Figura 29.

Principais causas da ocorrência de excentricidade no motor é:

- Empenamento do rotor devido às elevadas temperaturas;
- Rotor e eixo não concêntricos;
- Imperfeições oriundas do processo de fabricação;

Figura 29 – Excentricidade do entreferro.



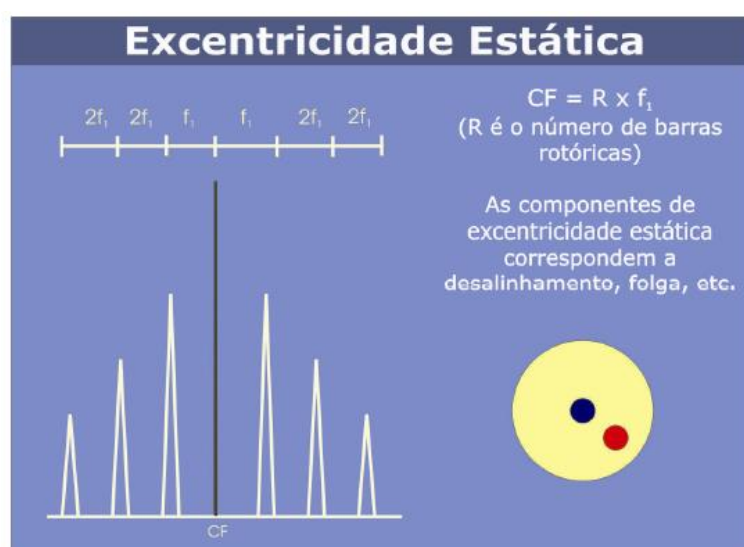
Fonte: Bonaldi, Erick Leandro, 2006.

A detecção de falha relacionada a excentricidade pode ser dividida em duas classes: excentricidade estática e excentricidade dinâmica.

De acordo com Bonaldi Erick Leandro (2016):

Excentricidade estática é quando a distância radial mínima do entreferro é fixa, defeito provocado por posicionamento incorreto do rotor ou estator, consequência de um desalinhamento na máquina. O espectro padrão para identificação deste tipo de falha é visto na Figura 30.

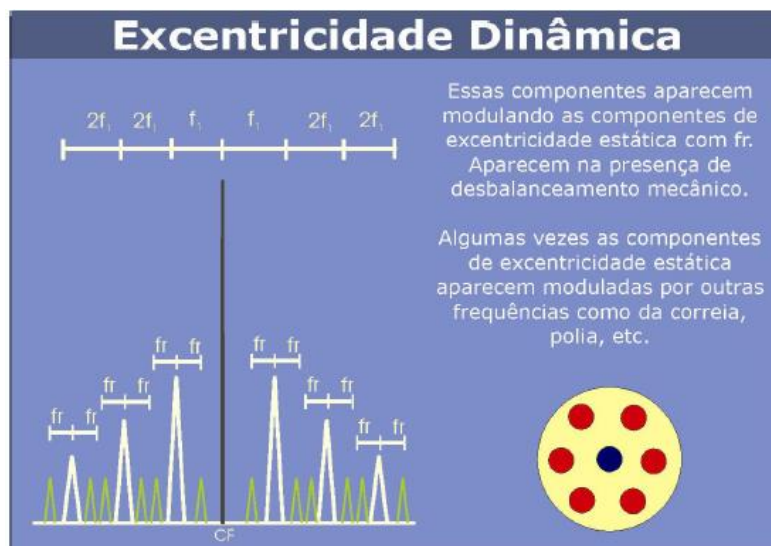
Figura 30 – Espectro padrão de excentricidade do entreferro estática.



Fonte: Bonaldi, Erick Leandro, 2006.

Excentricidade dinâmica é quando a distância radial mínima do entreferro gira com o rotor. Têm como principais razões empenamento ocasionado por elevadas temperaturas, defeito no rolamento e desbalanceamento do rotor. O espectro padrão para identificação deste tipo de falha é visto na Figura 31.

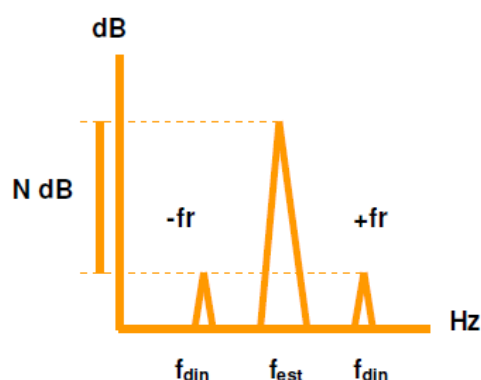
Figura 31 – Espectro padrão de excentricidade do entreferro dinâmica.



Fonte: Bonaldi, Erick Leandro, 2006.

Para análise deste tipo de falha é utilizada a Tabela 6 que apresenta a severidade do defeito encontrado levando em consideração a diferença da amplitude em dB da componente de excentricidade dinâmica com relação a amplitude da componente estática. Diferente da análise da falha de barras trincadas, a amplitude das componentes não é comparada com a componente fundamental (Bonaldi, 2016).

Tabela 6 – Severidade de excentricidade



Nível de Severidade	Diferença em dB	Ação recomendada
1	>40	Nenhuma
2	40-20	Verificar tendência
3	<20	Alarme (MCSA)

Fonte: Bonaldi, Erick Leandro, 2006.

Na Tabela 7 são representadas as equações das bandas laterais (harmônicos) que são características para os possíveis tipos de falhas encontrados no MIT.

Tabela 7 – Severidade de defeitos e recomendações para diagnóstico de análise de corrente.

Avarias	Frequências	Símbologia
Barras Quebradas	$f_{Barras\ Quebradas} = (1 \pm 2k_b s) f_0 [Hz]$	f_0 - Frequência de alimentação k_b - Número inteiro positivo s - Escorregamento n_1 e n_2 - Números inteiros positivos n_{ds} - Número inteiro positivo f_r - Velocidade do rotor em frequência n_d - Ordem da excentricidade p - Pares de pólos n_{ws} - Categoria da excentricidade k - Número inteiro positivo R - Número de barras do rotor n_{cc} - Número inteiro positivo
Rolamentos	$f_{rolamento} = (0,4 \cdot n_1 + 0,6 \cdot n_2) \cdot (1 - s) \cdot f_0 [Hz]$	
Desalinhamento	$f_{Desalinhamento} = (f_0 \pm n_{ds} \cdot f_r) [Hz]$	
Excentricidades	$f_{excentricidade} = \left[(R \pm n_d) \cdot \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] \cdot f_0 [Hz]$	
Curto-circuitos	$f_{Curto-circuito} = \left[\left(\frac{n_{cc}}{p} (1-s) \pm k \right) \right] \cdot f_0 [Hz]$	

Fonte: Emerson, Process Management., 2006.

4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são detalhados as ferramentas e os métodos utilizados para aplicação prática das técnicas de manutenção preditivas para os motores de indução trifásicos, conforme apresentado no referencial teórico.

Este trabalho consiste na simulação de defeitos em um motor de indução trifásico afim de realizar a coletas de dados que serão utilizados para avaliar as condições da máquina ao ter defeitos inseridos gradativamente. Foram definidos limites para avaliação do equipamento através de normas e informações técnicas apresentadas no capítulo anterior.

Para o estudo realizado, foi utilizada uma bancada de teste, conforme está ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Bancada de teste.



Fonte: Autor.

A bancada para simulação é composta por um motor de indução trifásico, Figura 33. O motor possui as seguintes características conforme representado na placa de identificação mostrada na Figura 34.

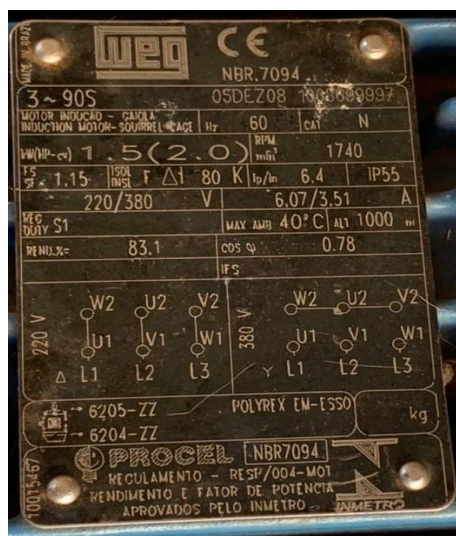
- Potência: 1,5 KW
- Velocidade: 1740 RPM (4 polos)
- Tensão nominal: 220/380 V Δ/Δ
- Corrente nominal: 6,07/3,57 A Δ/Δ
- Cos φ : 0,78
- Rotor em gaiola de esquilo

Figura 33 – Motor de indução WEG.



Fonte: Autor.

Figura 34 – Placa do motor de indução WEG.



Fonte: Autor

A título de simulação de carga acoplada ao eixo do motor indução, foi utilizada uma massa de 900g, representada na Figura 35, para que houvesse diferença de funcionamento da máquina sem carga no eixo e com carga.

Figura 35 – Massa de 900g para simular carga acoplada ao rotor do MIT.



Fonte: Autor.

Para coleta dos sinais obtidos através do acelerômetro e alicate amperímetro, Figuras 36 e 37 respectivamente, o coletor/analizador (mostrado na Figura 38) em conjunto com o adaptador de entrada de sinal (Figura 39), que possibilitam a conversão dos sinais obtidos através do transdutor e do alicate amperímetro.

Figura 36 – Acelerômetro piezoelétrico (transdutor sísmico).



Fonte: Autor.

Figura 37 – Alicate Amperímetro FLUKE i400s.



Fonte: Autor.

Figura 38 – Coletor CSI 2120.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Adaptador de entrada do analisador CSI 2120.



Fonte: Autor.

O ensaio na bancada de teste foi realizado de forma a obter 11 leituras para o processo de coletar a vibração e o espectro de corrente para cada condição que era imposta ao motor. A medição de vibração foi realizada conforme recomendações da norma ABNT NBR 10082. Para aplicação da MCSA foi utilizado técnicas baseadas nas literaturas expostas no capítulo anterior que fazem uso de um alicate amperímetro para obtenção da corrente de cada fase por vez.

A aplicação dos defeitos foi realizada todas em um único motor, a estratégia foi provocar avarias que tivessem seu grau de severidade aumentadas gradativamente, sendo assim, as leituras começam com aplicação de defeitos não destrutivos até chegar aos destrutivos.

As medições foram realizadas da seguinte forma:

1ª leitura: MIT em perfeitas condições, sem aplicação de defeito e sem uso da massa no rotor para simular carga. Conforme Figura 40.

Figura 40 – Configuração para realização da 1ª leitura.



Fonte: Autor.

2ª leitura: MIT em perfeitas condições com aplicação da massa acoplada ao rotor para simular uma pequena carga. Conforme Figura 41.

Figura 41 – Configuração para realização da 2ª leitura.



Fonte: Autor.

3ª, 4ª e 5ª leitura: MIT em funcionamento, sem danos no corpo do equipamento. Bornes de alimentação da fase mal conectado. Simulado afrouxamento em uma fase por vez enquanto as outras estavam com os bornes firmes e conectados. Conforme Figura 42.

Figura 42 – Configuração para realização da 3ª, 4ª e 5ª leitura.



Fonte: Autor.

6ª, 7ª, 8ª leitura: MIT em funcionamento, sem danos no corpo do equipamento. Borne de alimentação da fase desconectado. Simulada operação com falta de uma fase por vez enquanto as outras estavam firmes e conectados. Conforme Figura 43.

Figura 43 – Configuração para realização da 6ª, 7ª e 8ª leitura.



Fonte: Autor.

9ª leitura: MIT em funcionamento com uma torção na carcaça do motor. Provocado um espaçamento na tampa dianteira do equipamento com duas arruelas. Conforme Figura 44.

Figura 44 – Configuração para realização da 9ª leitura.



Fonte: Autor.

10ª leitura: MIT em funcionamento com abertura no entreferro das barras do estator para simular um defeito de trinca. Conforme Figura 45.

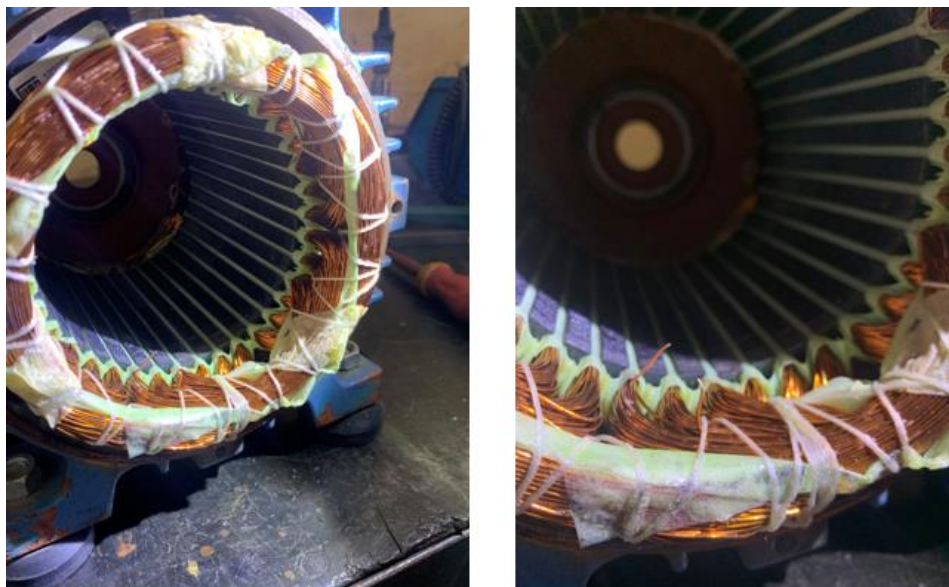
Figura 45 – Configuração para realização da 10ª leitura.



Fonte: Autor.

11ª leitura: MIT em funcionamento com abertura no entreferro das barras do estator e com um filamento do bobinado rompido. Conforme Figura 46.

Figura 46 – Configuração para realização da 11ª leitura.

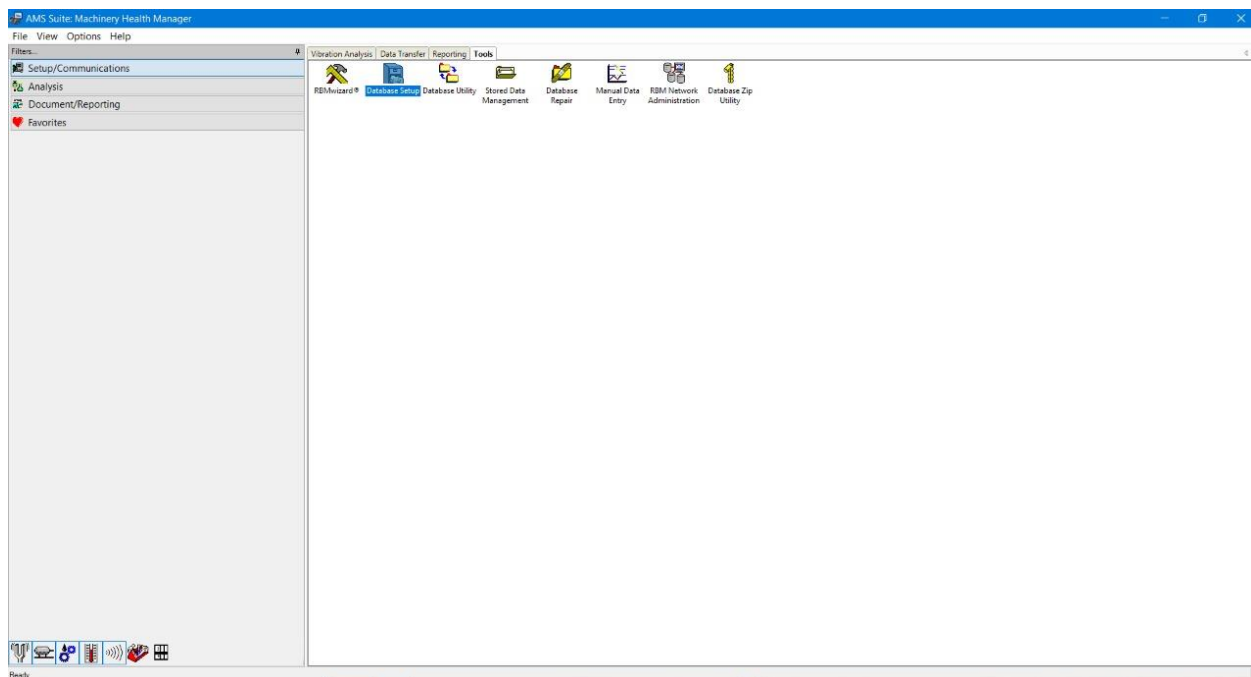


Fonte: Autor.

Com as medições realizadas e armazenadas no CSI 2120, é necessário descarregar os dados no computador para que análise dos defeitos aplicados sejam diagnosticados e observados

através dos gráficos de espectro. Na Figura 47 é ilustrado a interface do Software AMS® Suite: Machinery Health Manager 5.0 que é a plataforma utilizada para realização de diagnóstico dos sinais obtidos através das leituras realizadas no motor de indução trifásico.

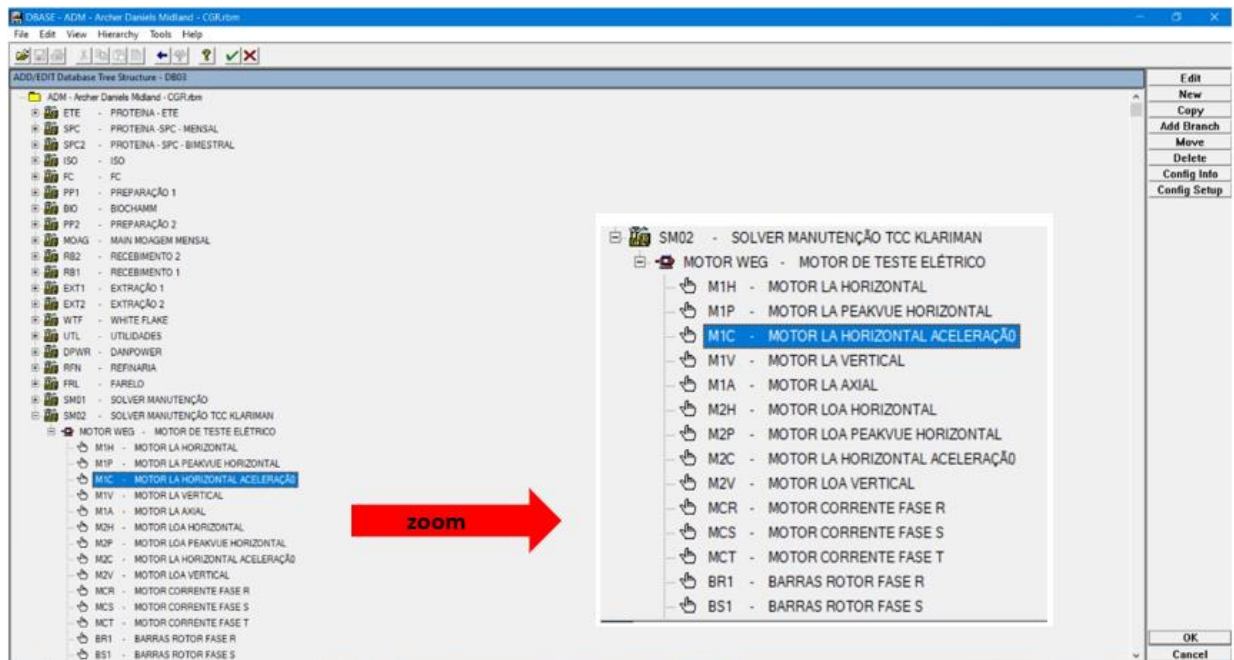
Figura 47 – Interface do Software utilizado para as análises MCSA e de vibração.



Fonte: Autor.

O Software AMS® Suite: Machinery é onde realiza-se a configuração do coletor CSI 2120 e sua rota que é a determinação dos pontos que serão coletados através dos sensores. Para a simulação realizada foi necessário configurar o Software conforme as características construtivas do motor de indução trifásico utilizado e os pontos de medição, conforme Figura 48.

Figura 48 – Interface do AMS Suite com os pontos de medição configuração para simulação do MIT estudado.



Fonte: Autor.

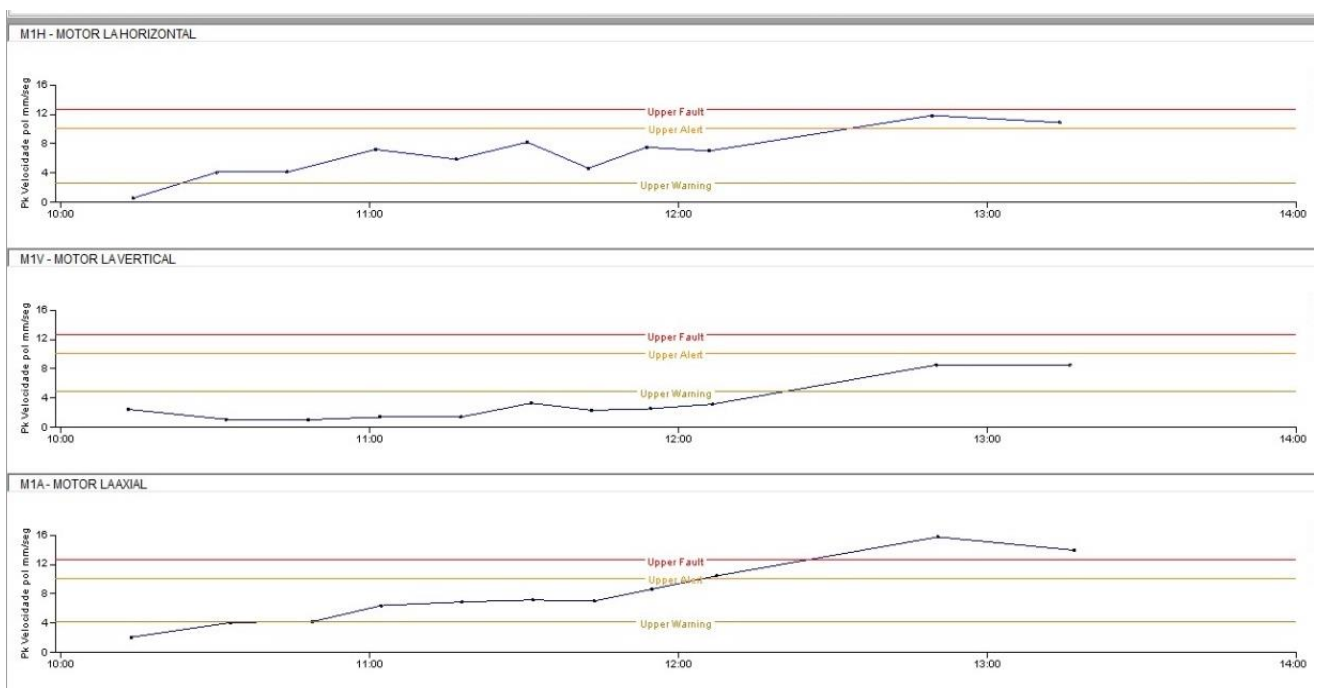
5. RESULTADOS

Este capítulo descreve os resultados obtidos usando as técnicas de manutenção preditiva descritas no Capítulo 3, utilizando a metodologia para execução dos testes, conforme o Capítulo 4.

5.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

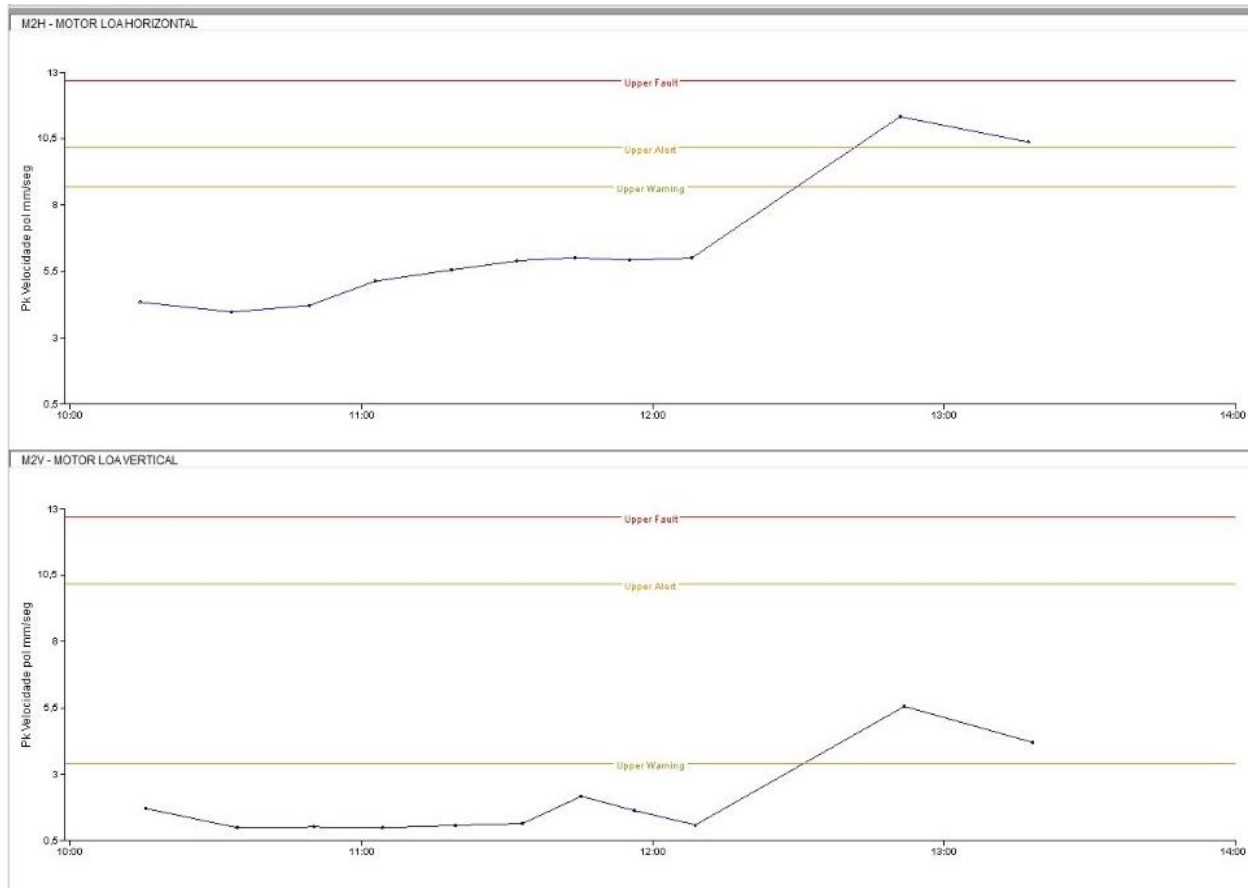
A princípio é apresentada uma visão geral dos resultados da aplicação dos defeitos no motor através das curvas de tendências que é marcada pelo eixo X com o horário em que a coleta do dado foi realizada e a amplitude medida em mm/s (velocidade). A Figura 49 apresenta a evolução das falhas quanto a sua severidade, no lado de acionamento do motor (LA) nos sentidos: horizontal, vertical e axial. Na Figura 50 está representada a curva de tendência do Lado Oposto ao Acionamento (LOA), coletados no sentido vertical e horizontal. A curva de tendência tem como principal função a observação do aumento da amplitude que esta diretamente relacionado com o nível de severidade do defeito aplicado ao motor durante os testes, os alarmes apresentados são baseados em parâmetros pré-determinados no Software que estipula a gravidade baseada na aplicação da máquina.

Figura 49 – Curvas de tendências LA.



Fonte: Autor.

Figura 50 – Curvas de tendências LOA.

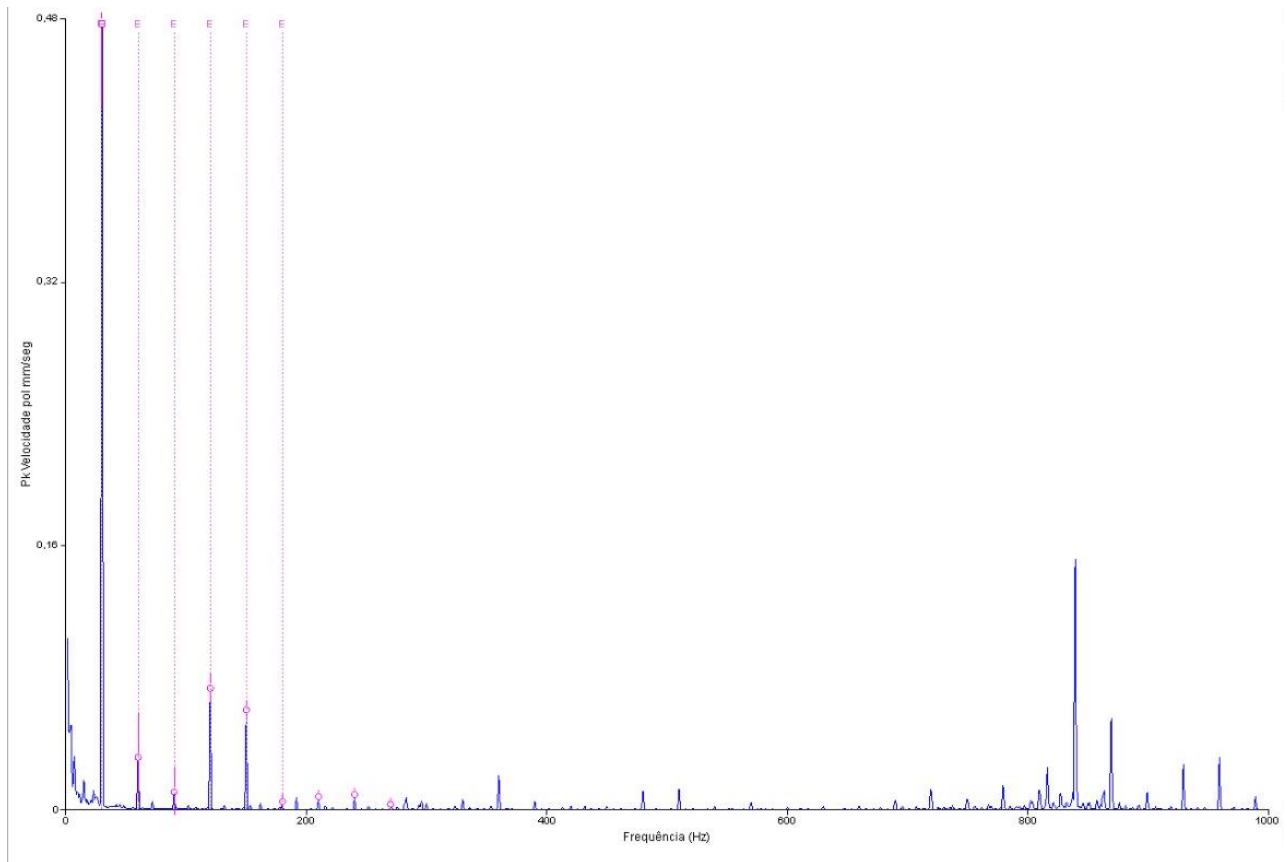


Fonte: Autor.

5.1.1 Condições iniciais do MIT

A 1ª leitura no motor antes da aplicação de defeitos e sem a carga no eixo está mostrada na Figura 51. Ilustram-se as condições do motor operando com a frequência de rotação (***fr***) igual 30Hz; podemos observar que no parâmetro velocidade RMS no sentido LA do motor, está apresentando uma amplitude de 0,475 mm/s na frequência de referência (***fr***).

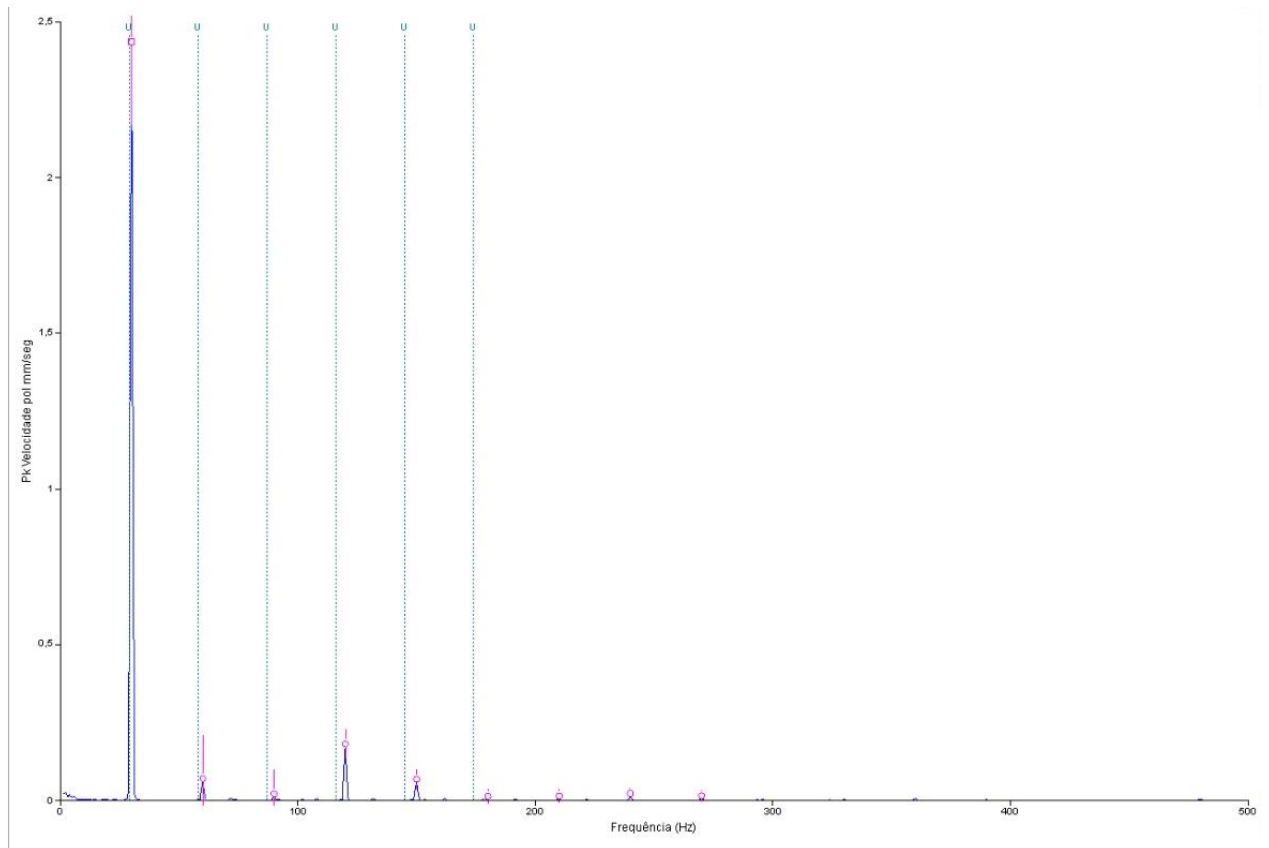
Figura 51 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT sem carga.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LA, mostrada na Figura 52, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 2,427mm/s, nas condições iniciais dos testes.

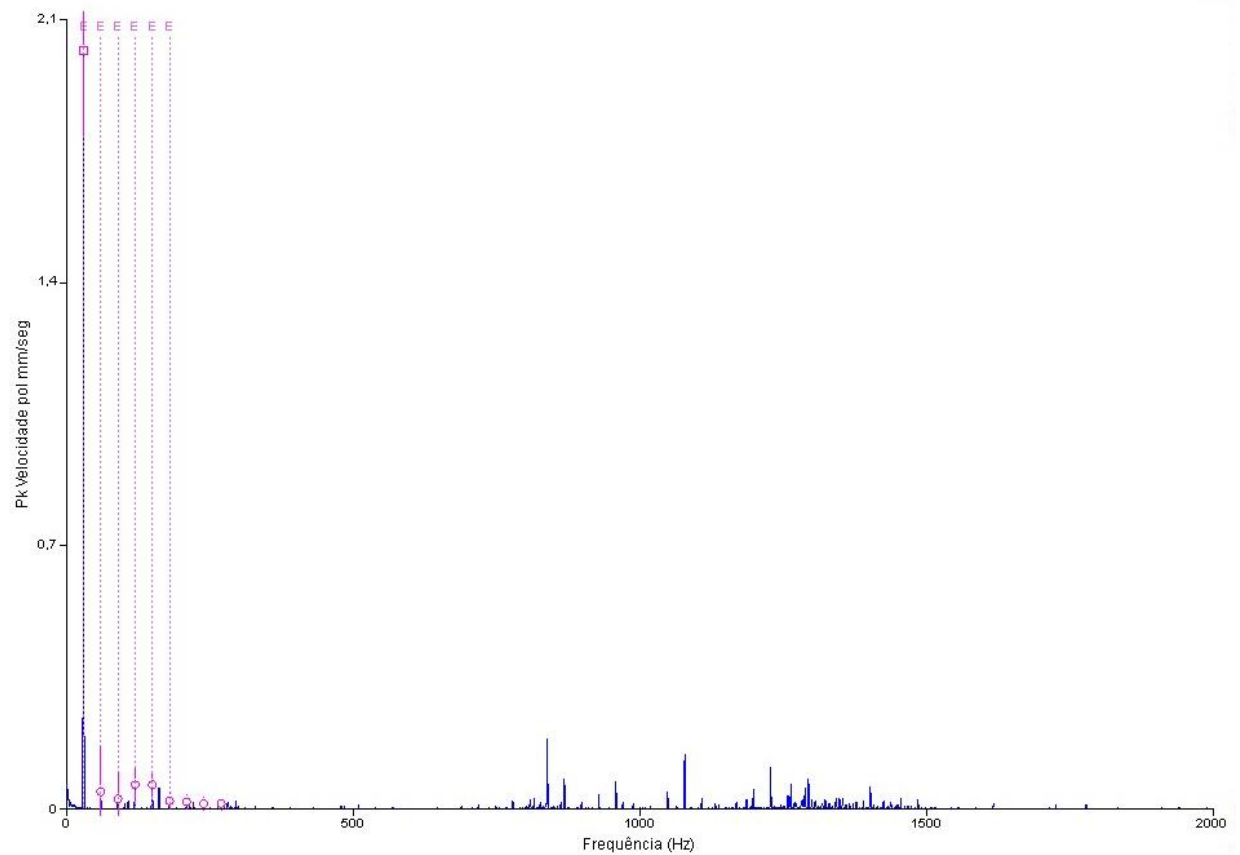
Figura 52 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT sem carga.



Fonte: Autor.

No sentido axial LA, conforme Figura 53, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 2,009 mm/s, nas condições iniciais dos testes.

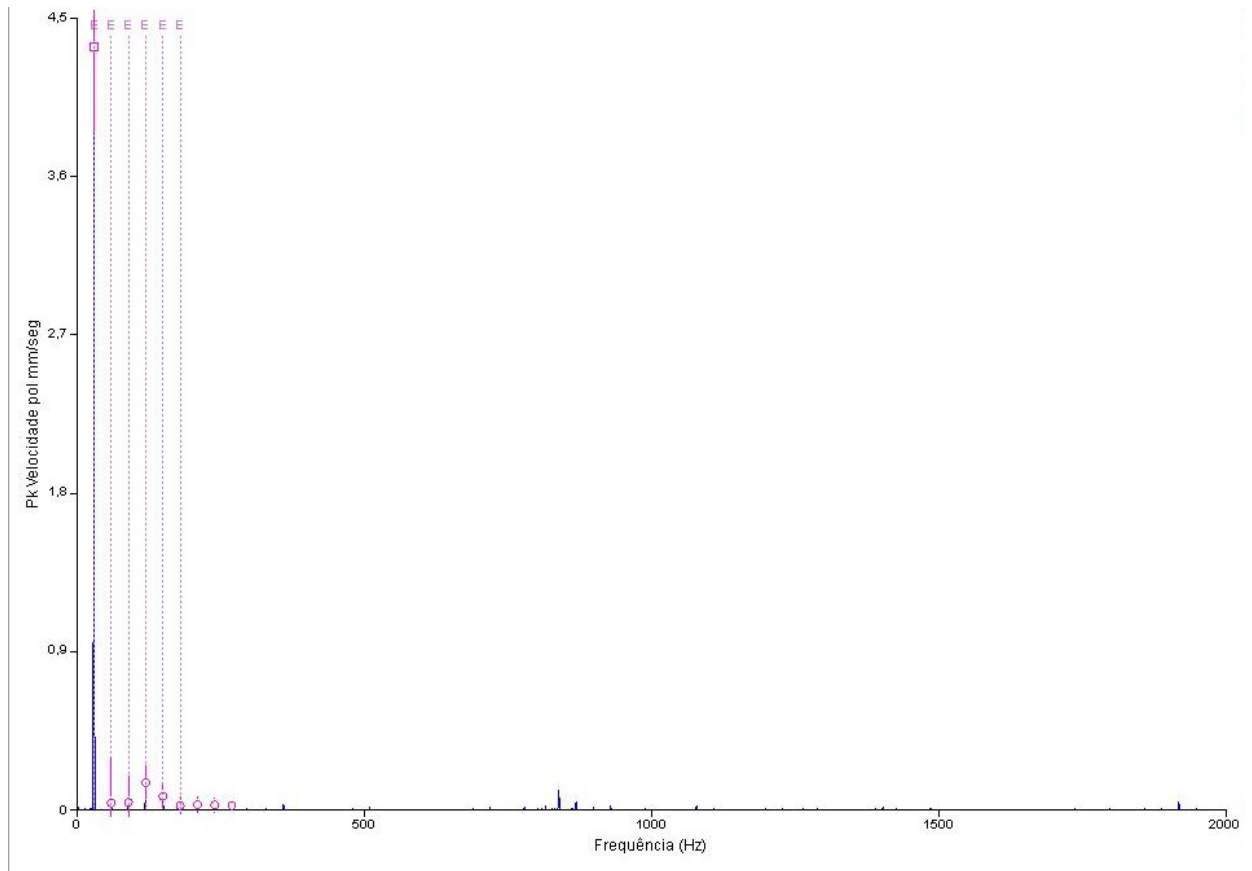
Figura 53 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT sem carga.



Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, mostrado na Figura 54 podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 4,318 mm/s, nas condições iniciais dos testes.

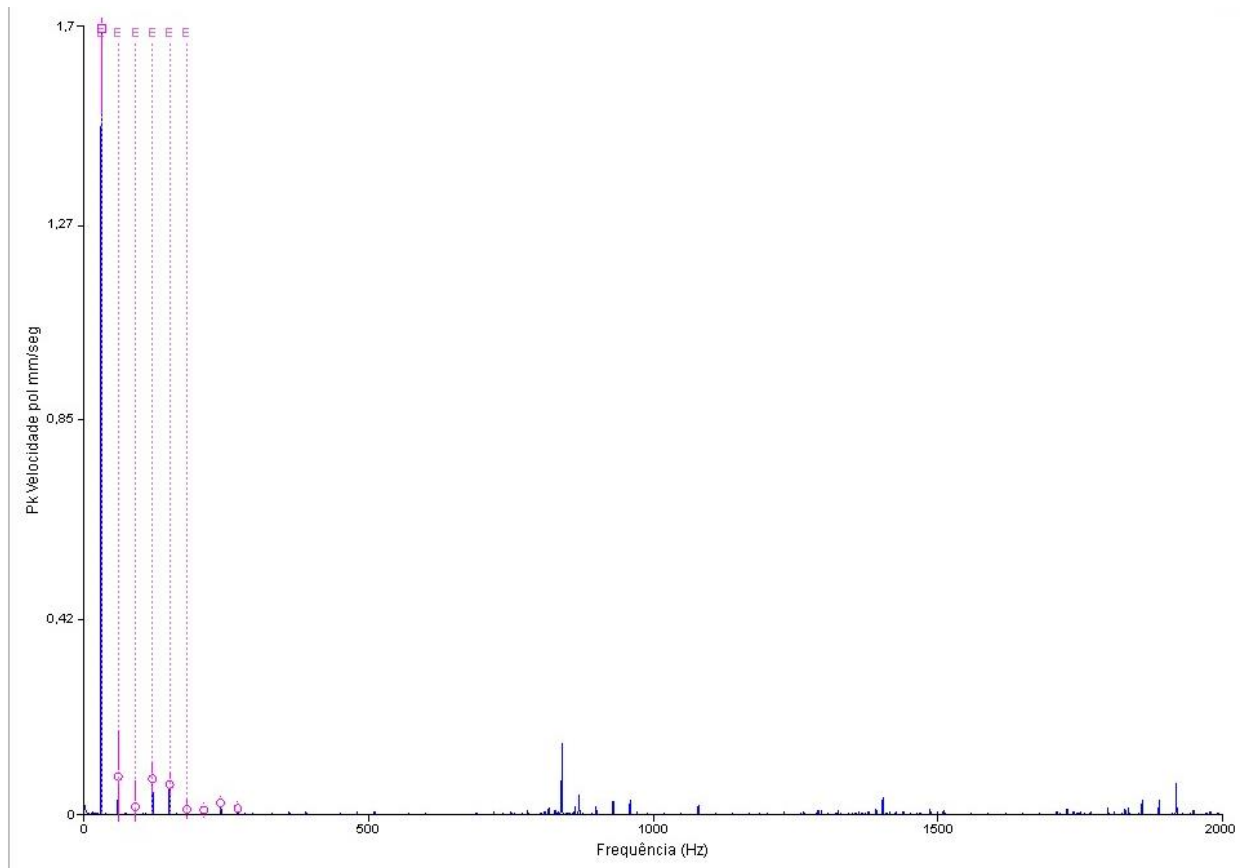
Figura 54 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT sem carga.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LOA, apresentado na Figura 55, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 1,686 mm/s, nas condições iniciais dos testes.

Figura 55 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT sem carga.

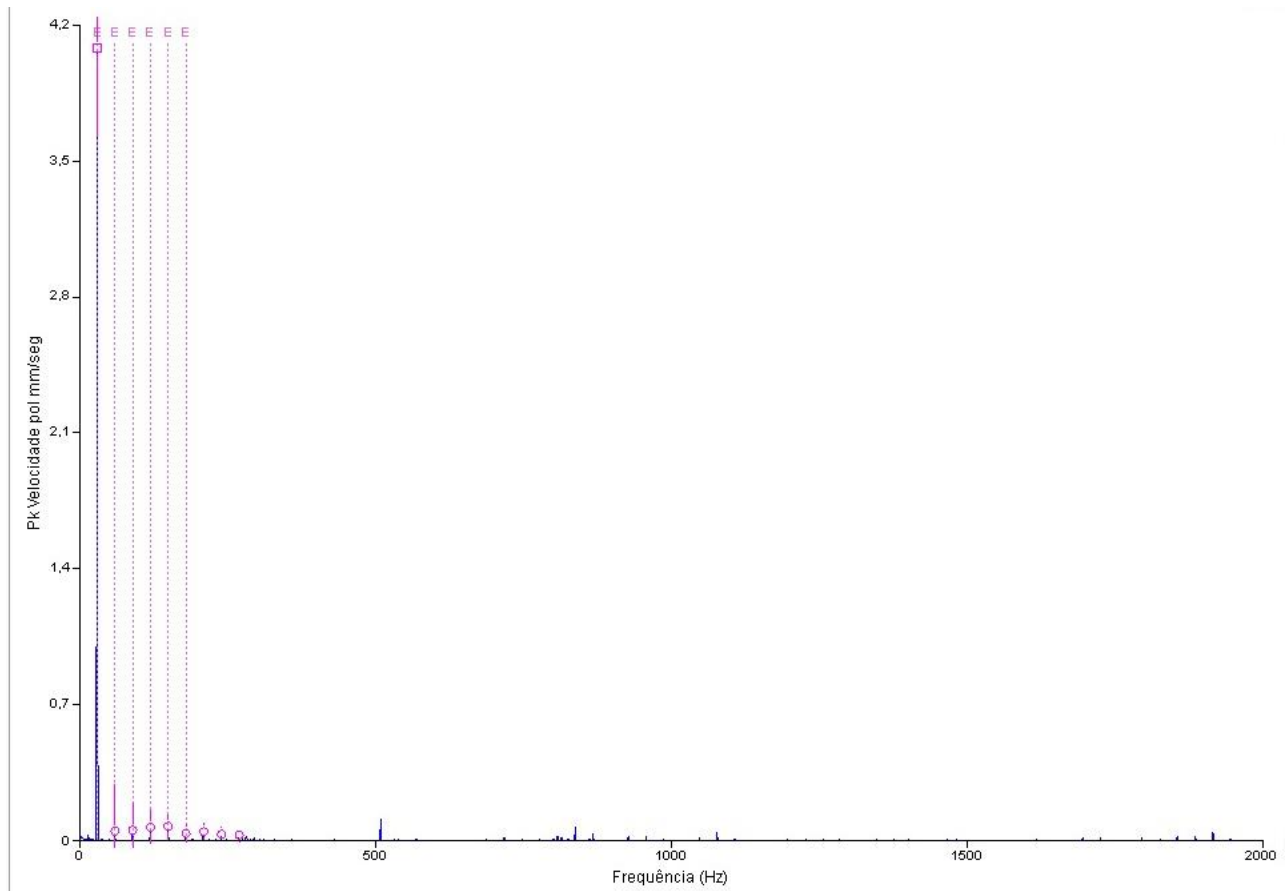


Fonte: Autor.

5.1.2 Teste com aplicação de carga acoplada ao eixo

A 2ª leitura do motor antes da aplicação de defeitos e com a carga no eixo, apresentada na Figura 56, ilustra as condições do motor operando com a frequência de rotação (*fr*) igual a 30Hz. Pode-se observar que no parâmetro velocidade RMS no sentido LA do motor, está apresentando uma amplitude de 4,060 mm/s.

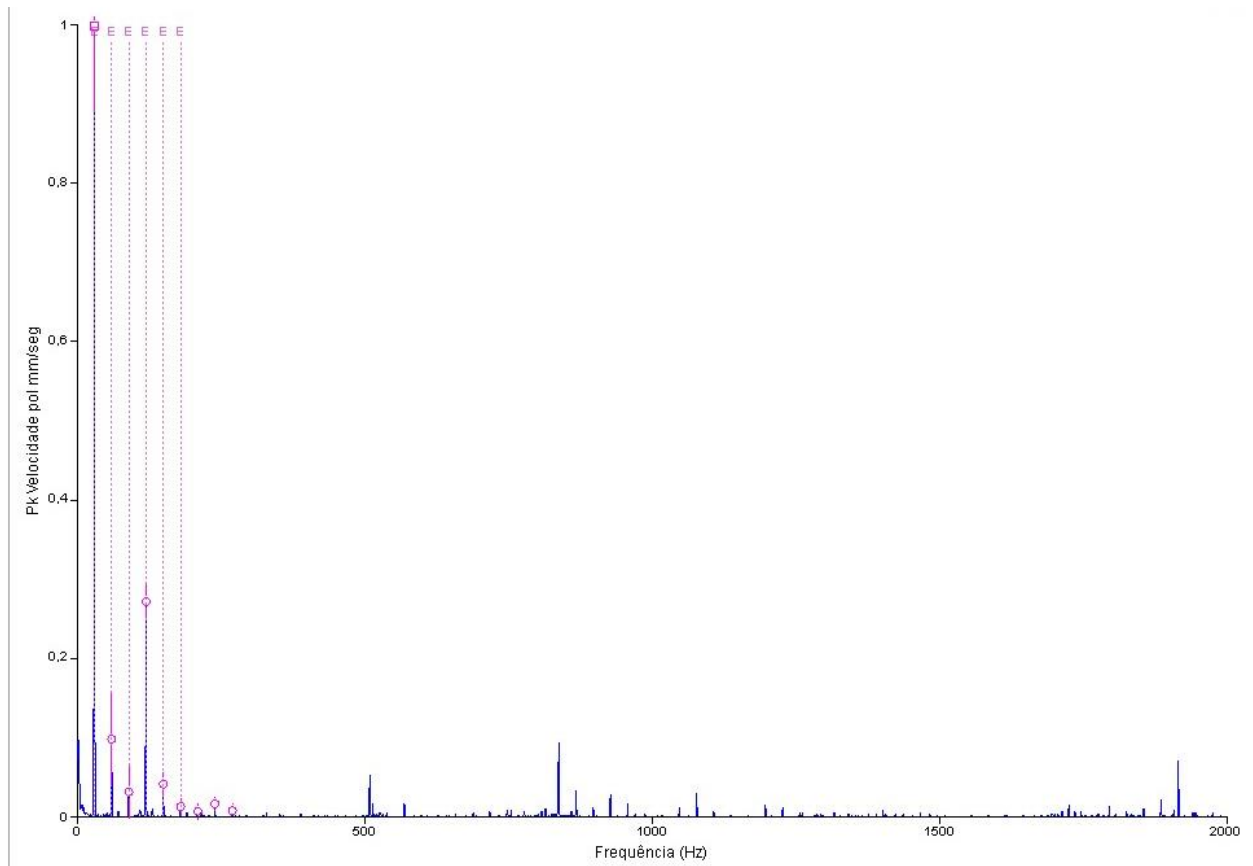
Figura 56 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LA, conforme a Figura 57, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 0,994 mm/s.

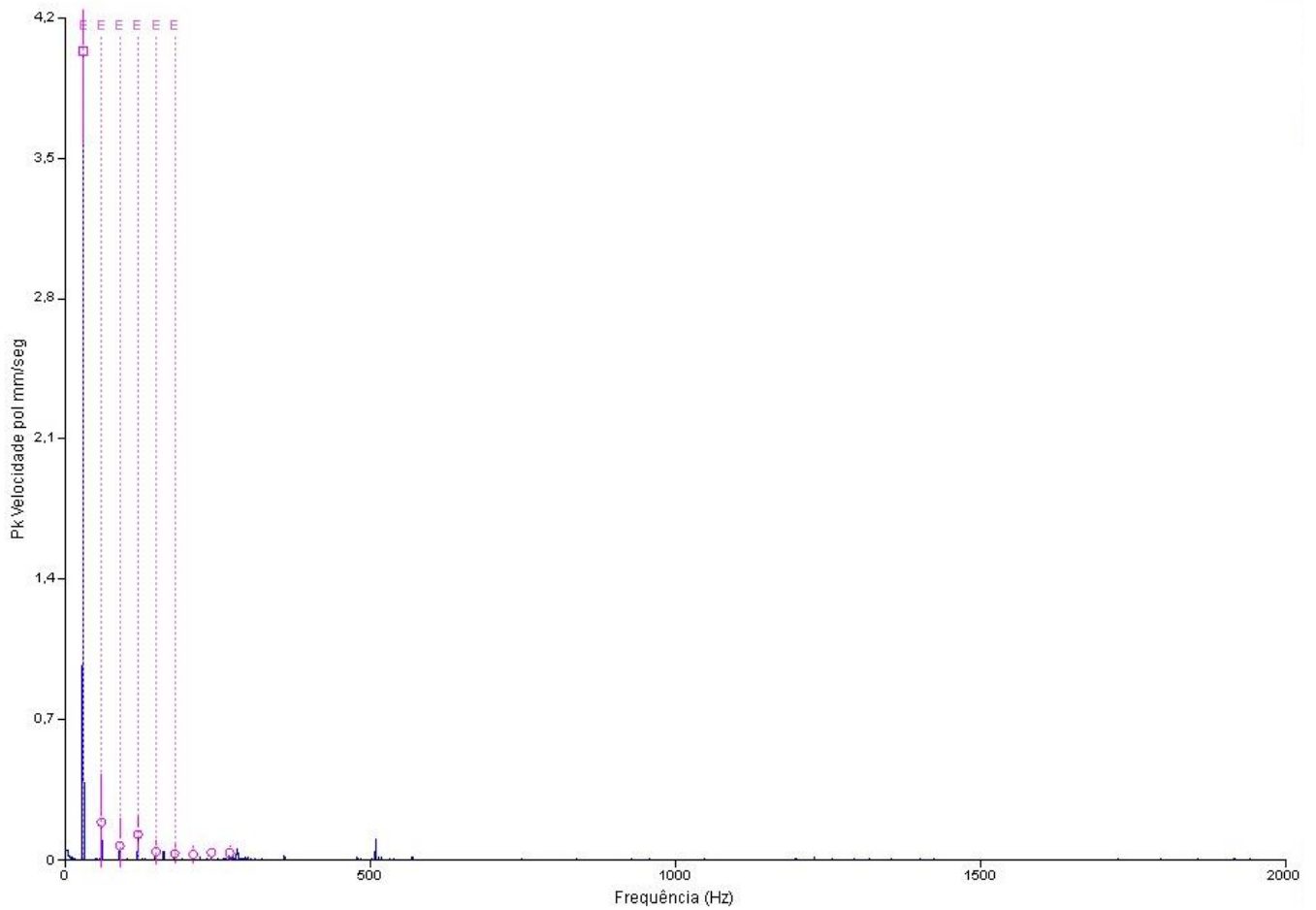
Figura 57 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT com carga.



Fonte: Autor.

No sentido axial LA, apresentado na Figura 58, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 4,017 mm/s.

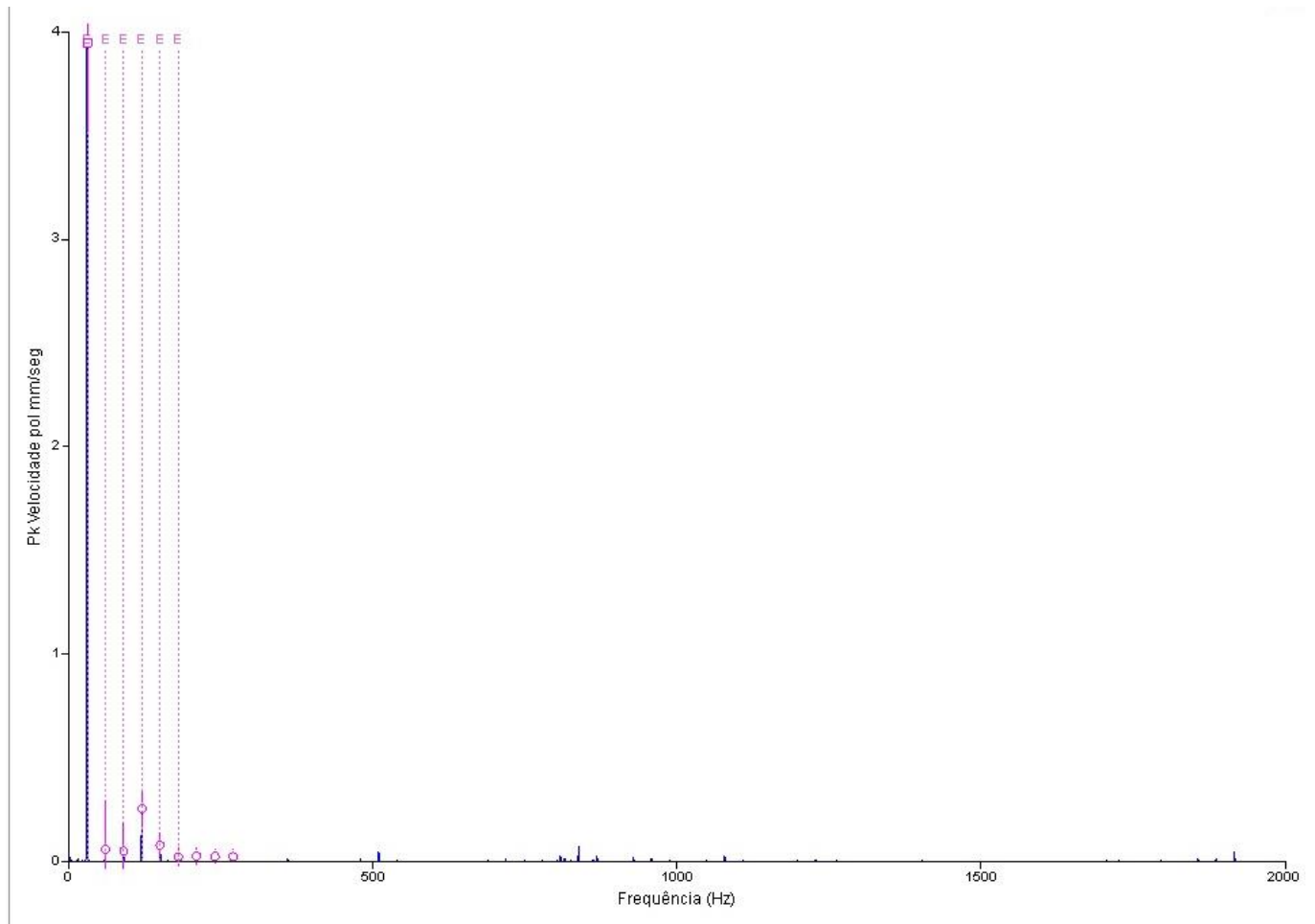
Figura 58 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga.



Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, conforme Figura 59, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 3,931 mm/s.

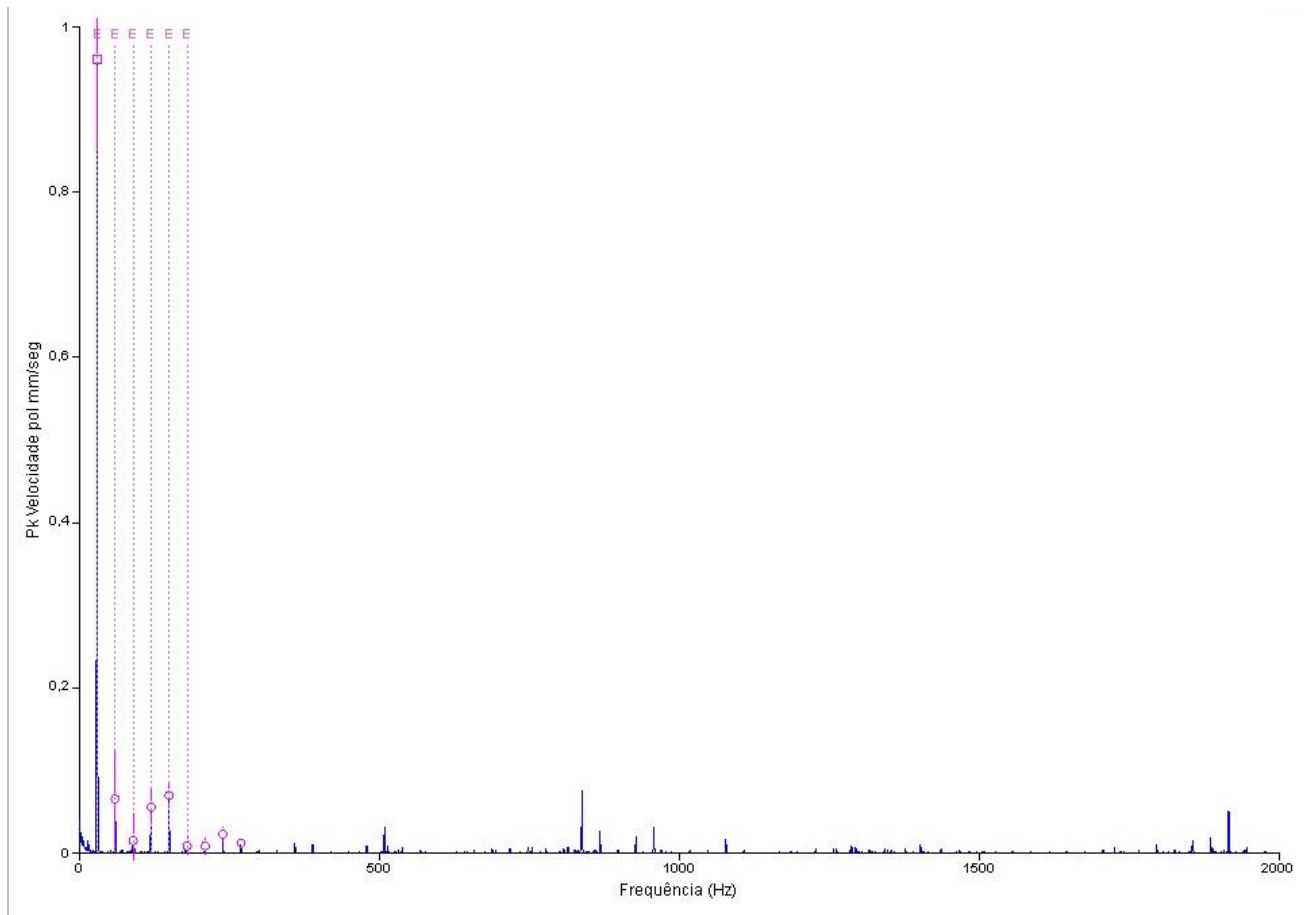
Figura 59 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LOA, Figura 60, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 0,955 mm/s.

Figura 60 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT com carga.

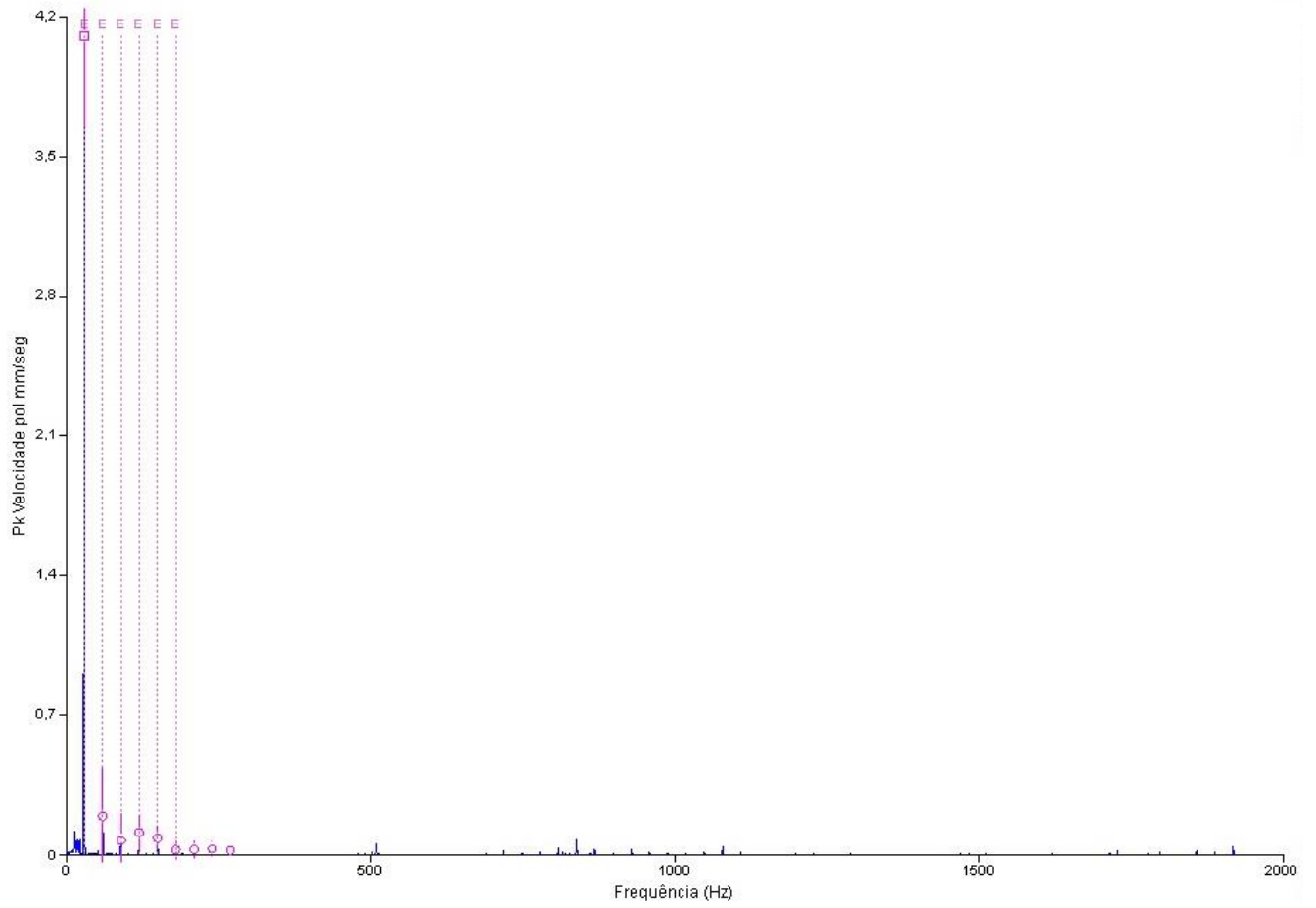


Fonte: Autor.

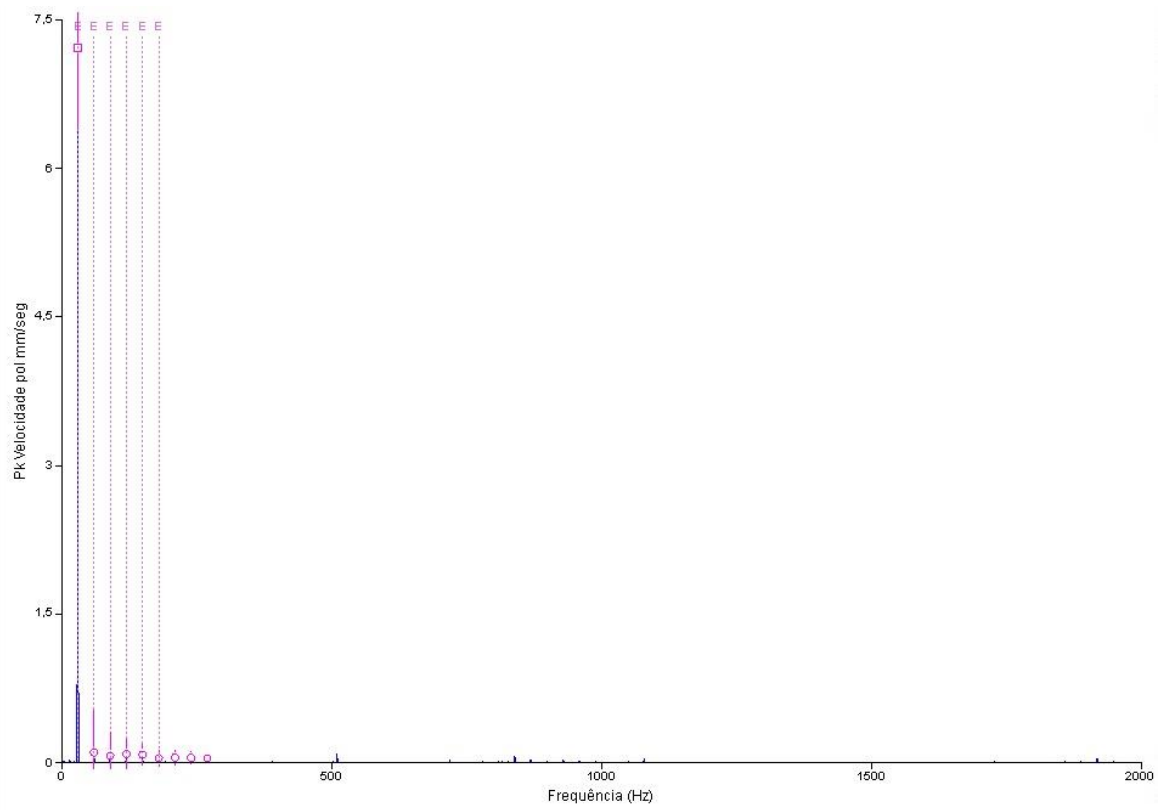
5.1.3 Teste com carga e borne solto

A 3ª, 4ª e 5ª leitura do motor com carga e afrouxamento das conexões da fase R, S e T, apresentada na Figura 61 (a), (b) e (c), está ilustrada as condições do motor operando com a frequência de rotação (***fr***) igual a 30Hz e com o parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA do motor, com amplitude para as três fases, conforme mostrado na Tabela 8.

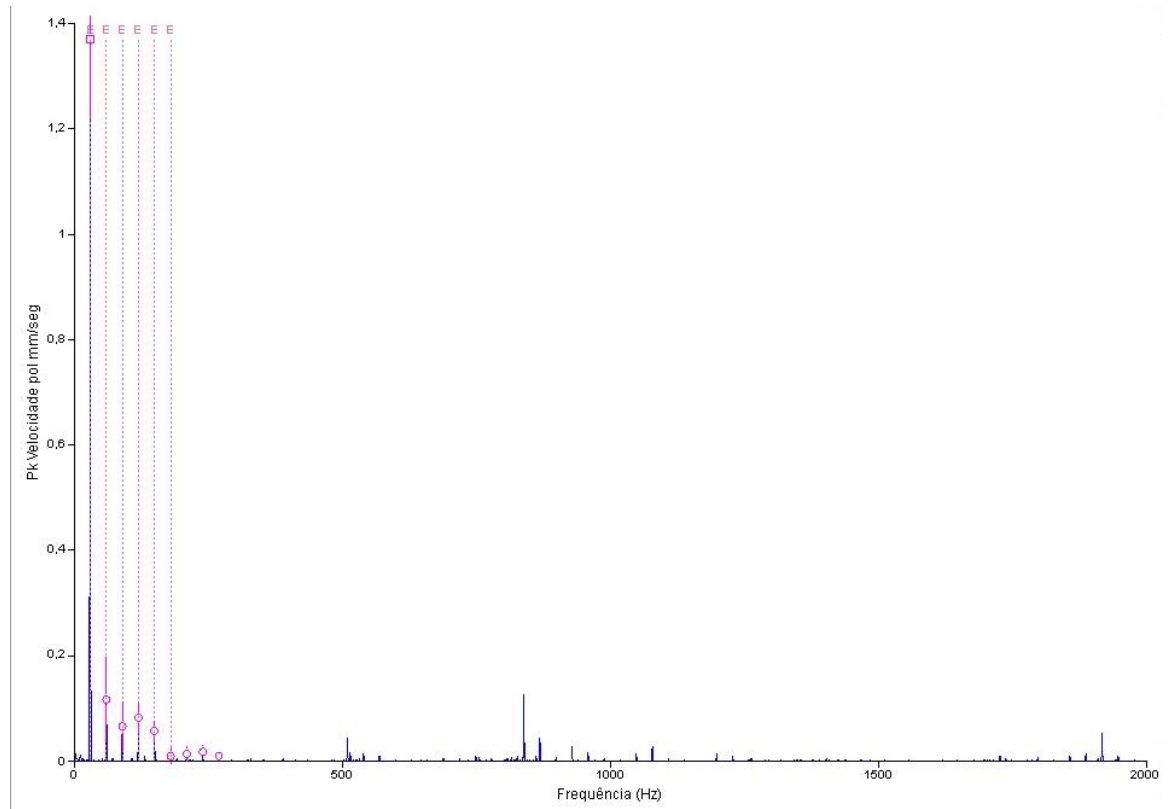
Figura 61 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

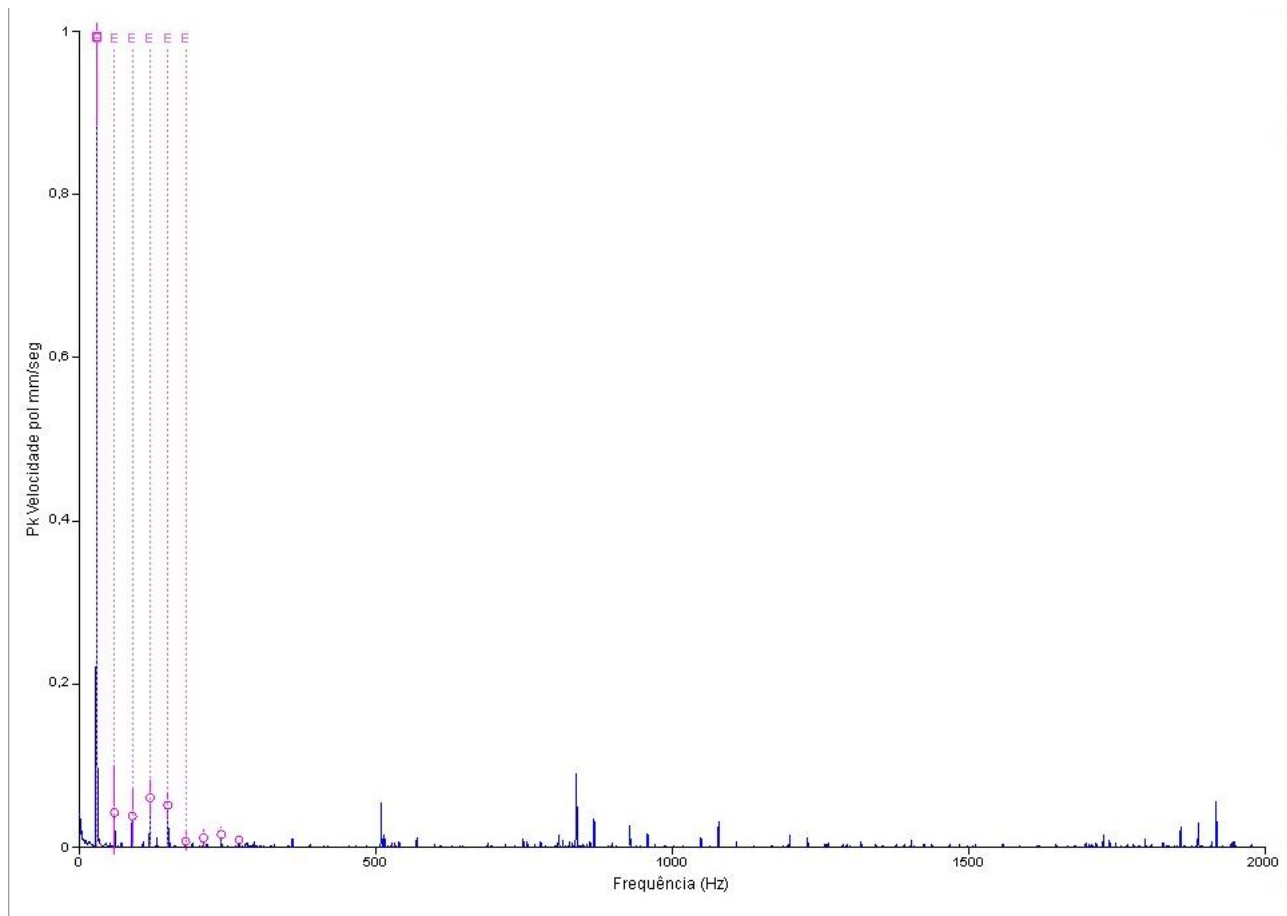
Tabela 8 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA - MIT com carga e bornes soltos.

FASE R	FASE S	FASE T
4,081 mm/s	7,175 mm/s	5,800 mm/s

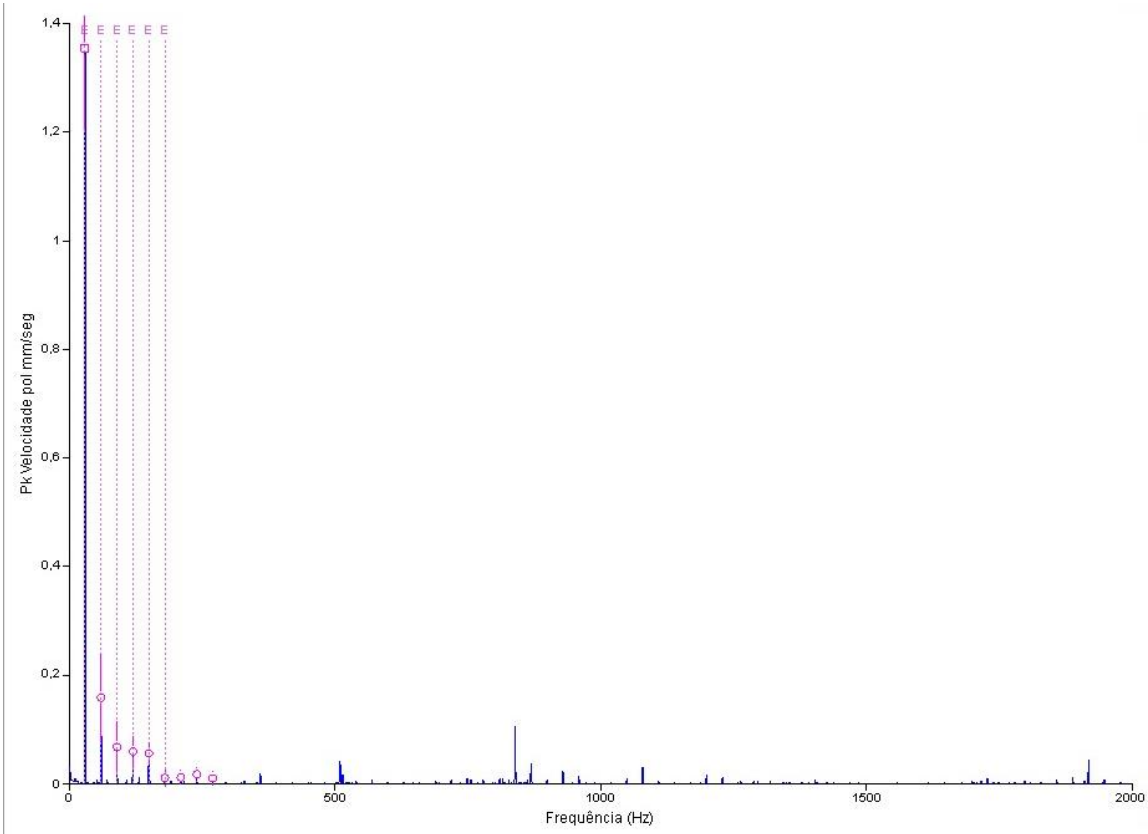
Fonte: Autor.

Já na Figura 62 (a), (b) e (c), pode-se observar o gráfico de espectro obtido no sentido vertical LA, que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência está apresentada na Tabela 9.

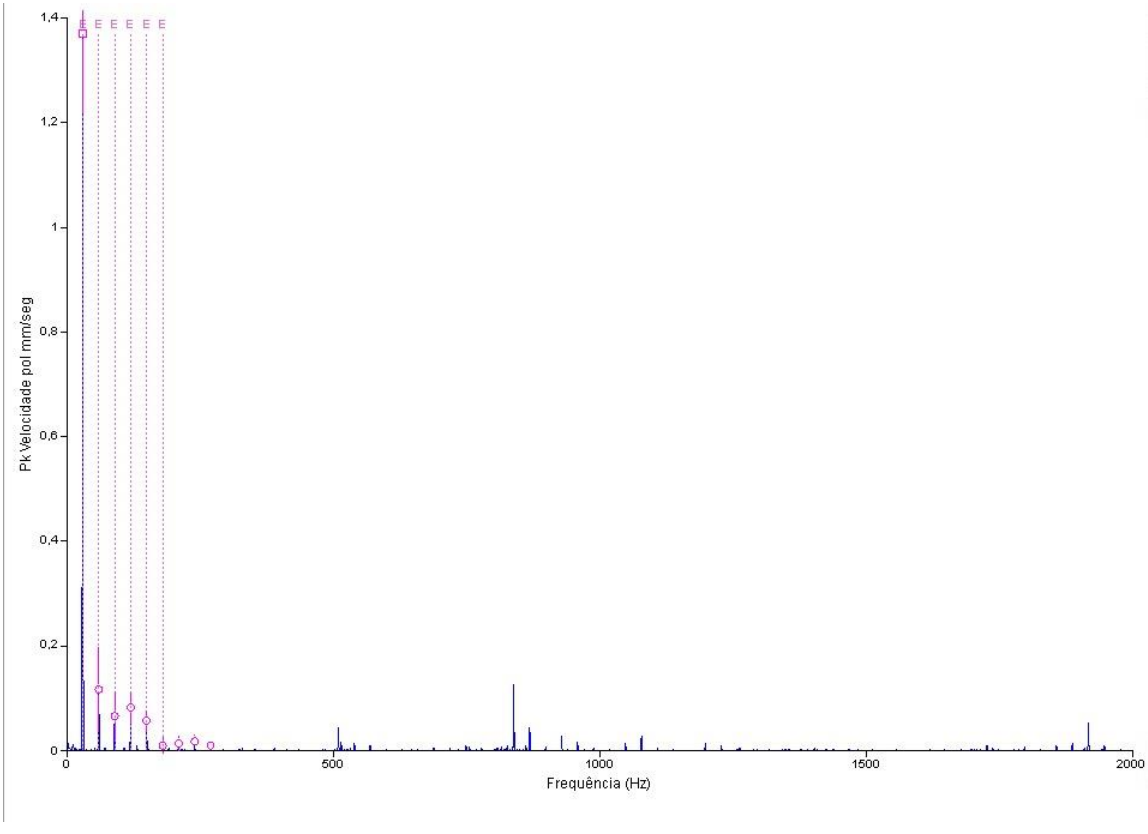
Figura 62 – Gráficos com espectros no sentido vertical LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

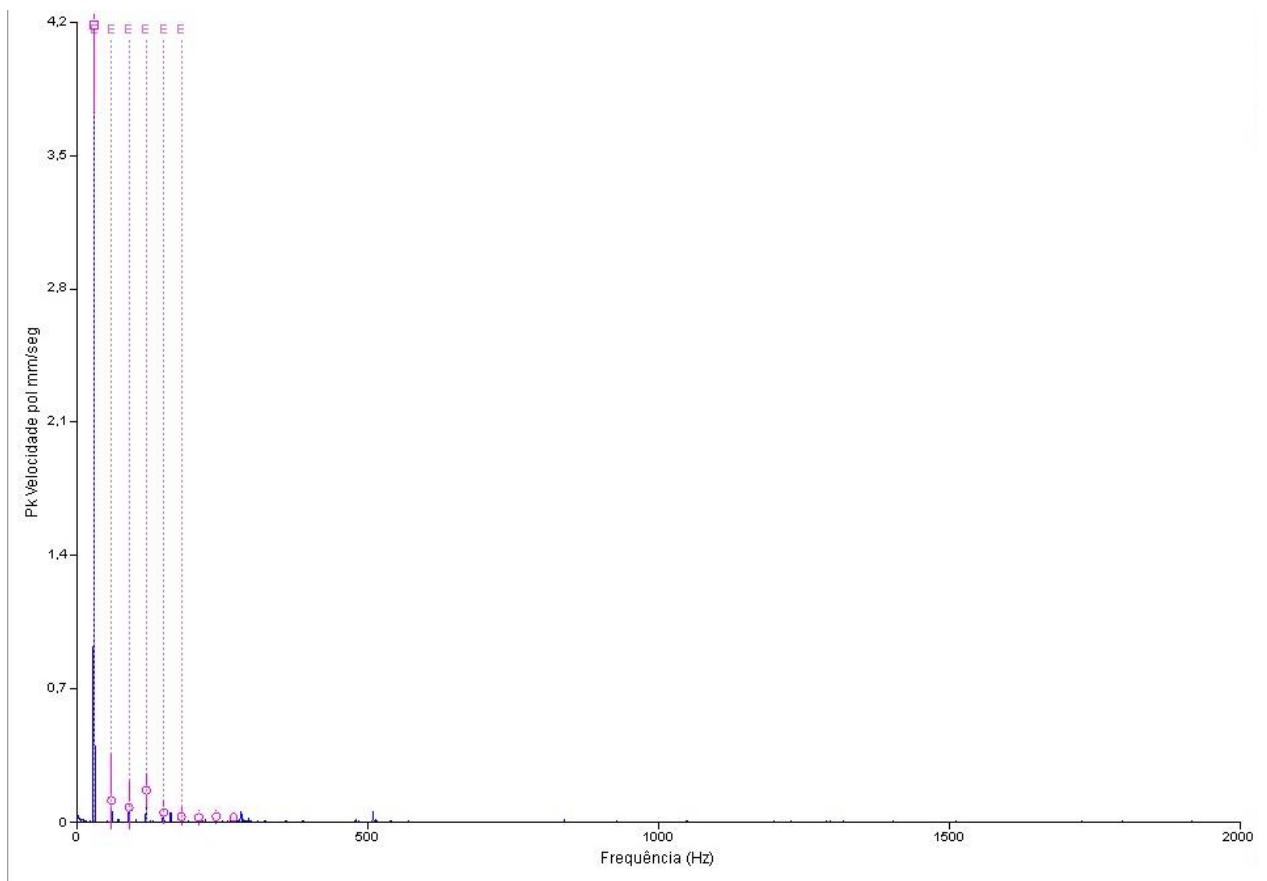
Tabela 9 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido vertical LA - MIT com carga e bornes soltos.

FASE R	FASE S	FASE T
0,988 mm/s	1,348 mm/s	1,364 mm/s

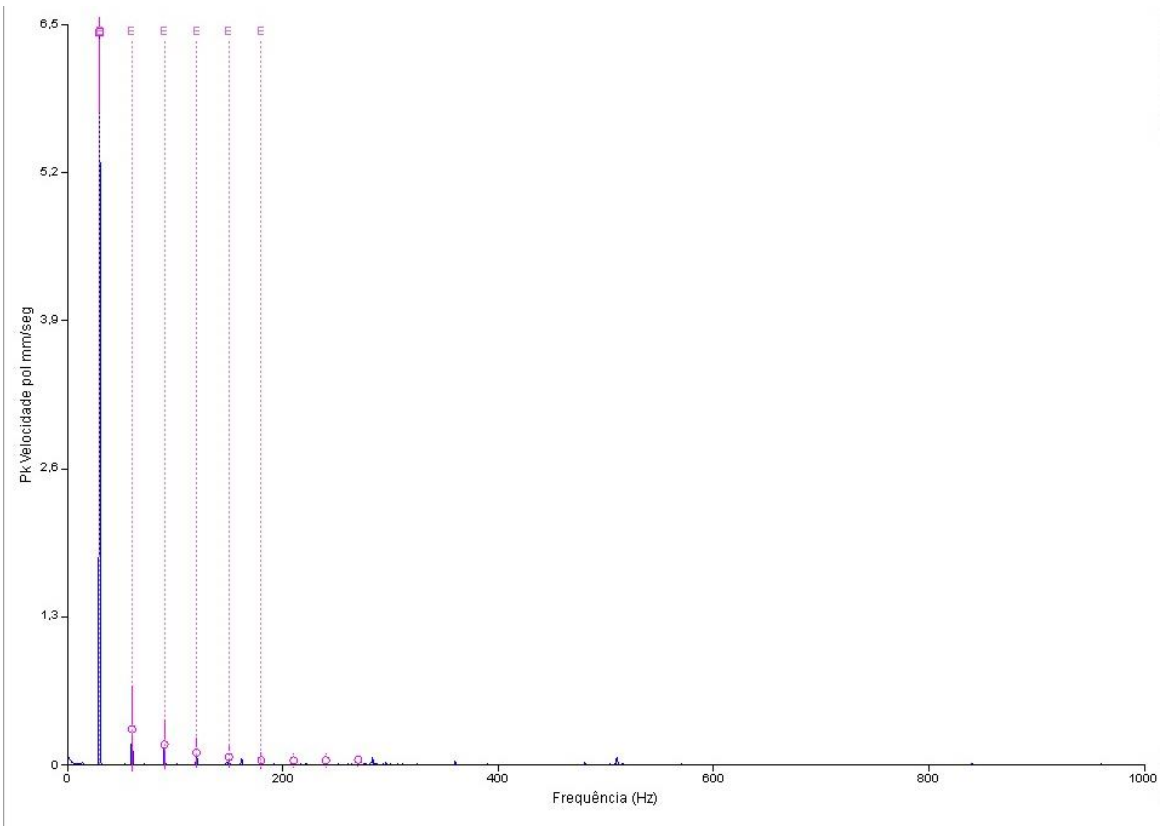
Fonte: Autor.

Na Figura 63 (a), (b) e (c), a medição foi feita no sentido axial LA, e através dele pode-se observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência está apresentada na Tabela 10.

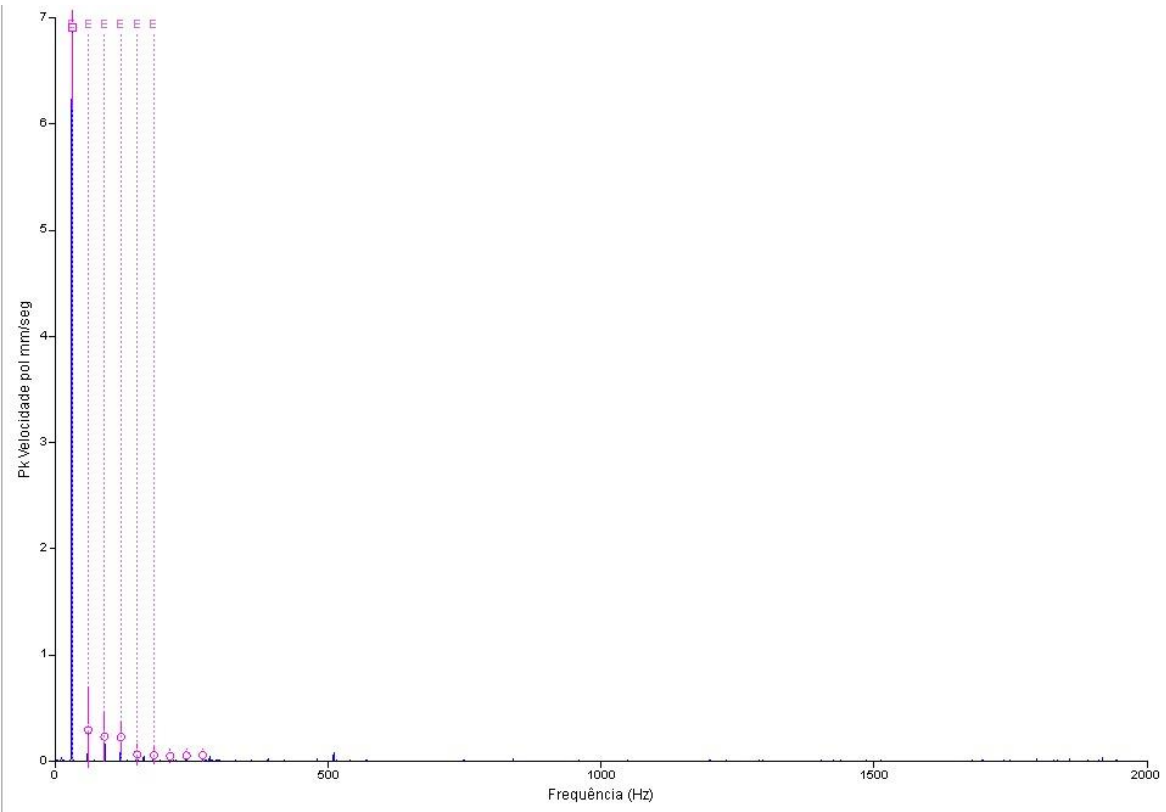
Figura 63 – Gráficos com espectros no sentido axial LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

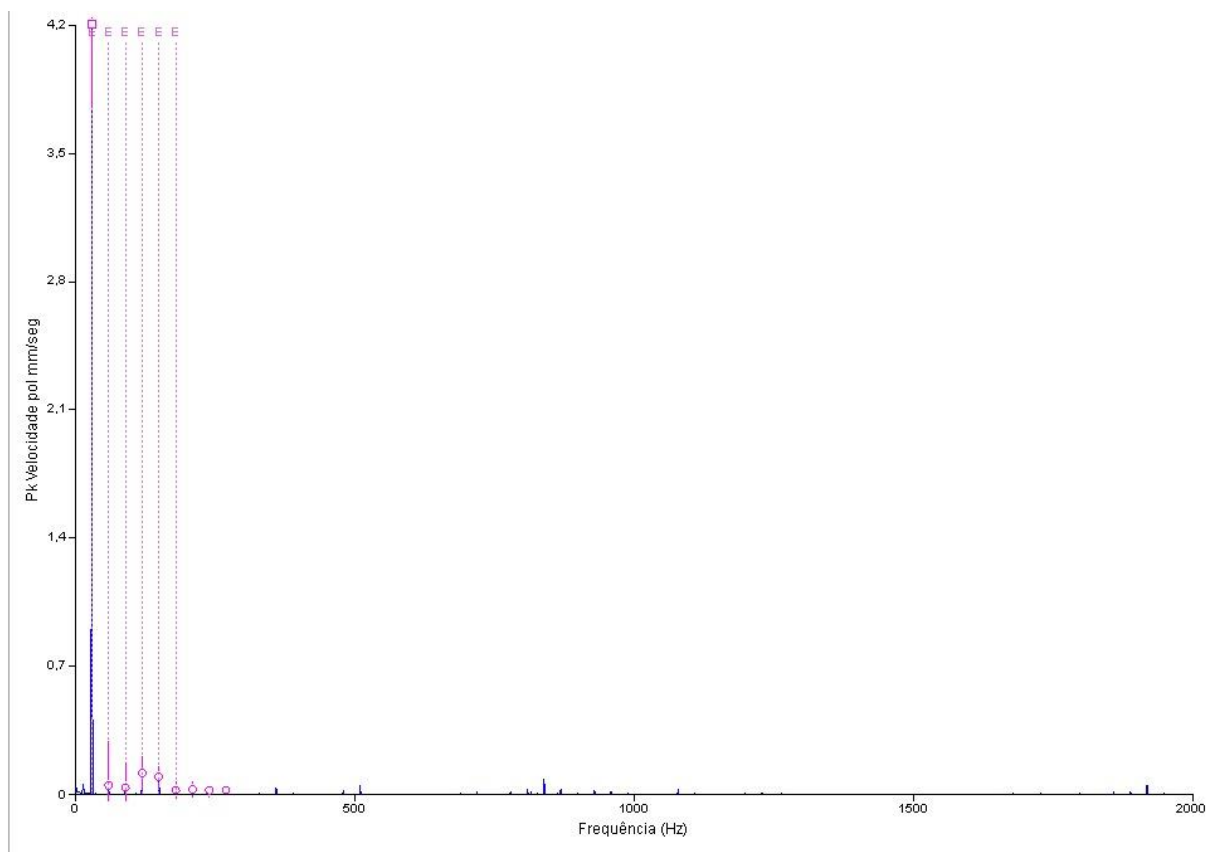
Tabela 10 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido axial LA - MIT com carga e bornes soltos.

FASE R	FASE S	FASE T
4,167 mm/s	6,401 mm/s	6,874 mm/s

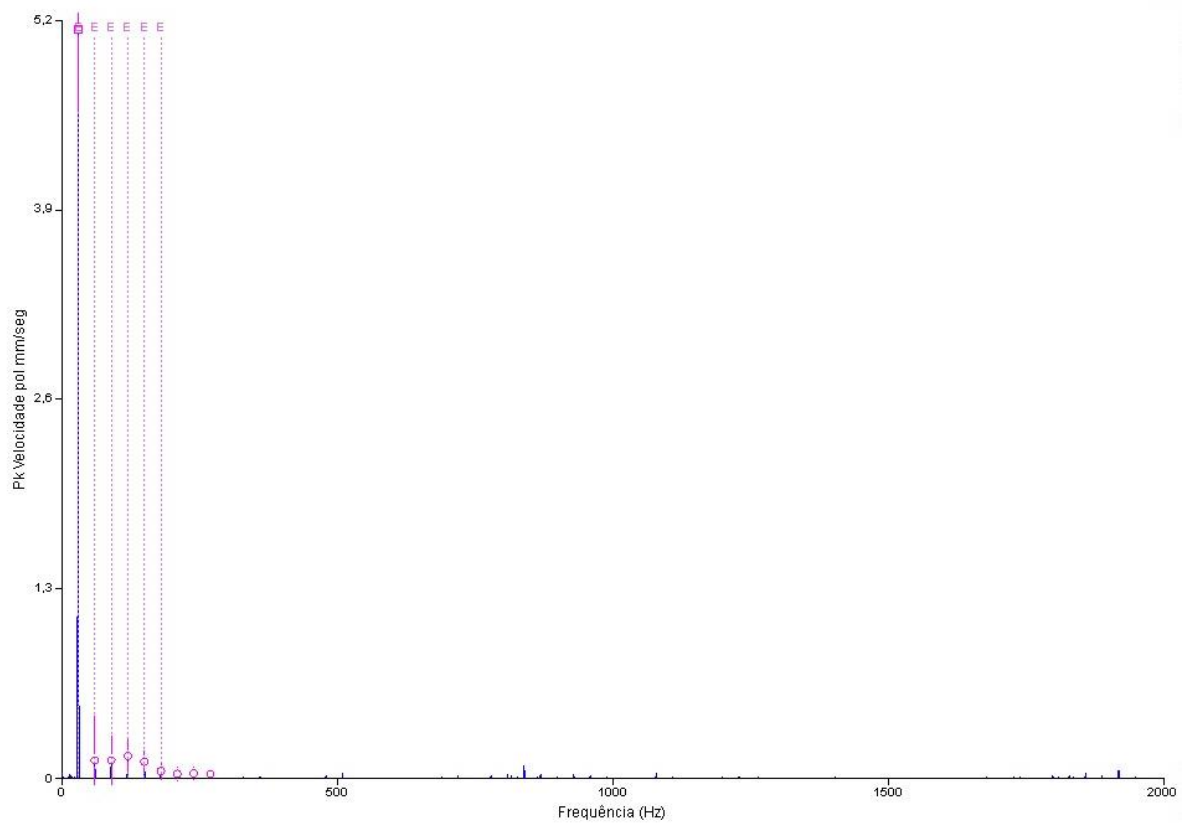
Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, conforme mostrado na Figura 64 (a), (b) e (c), podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência está apresentada na Tabela 11.

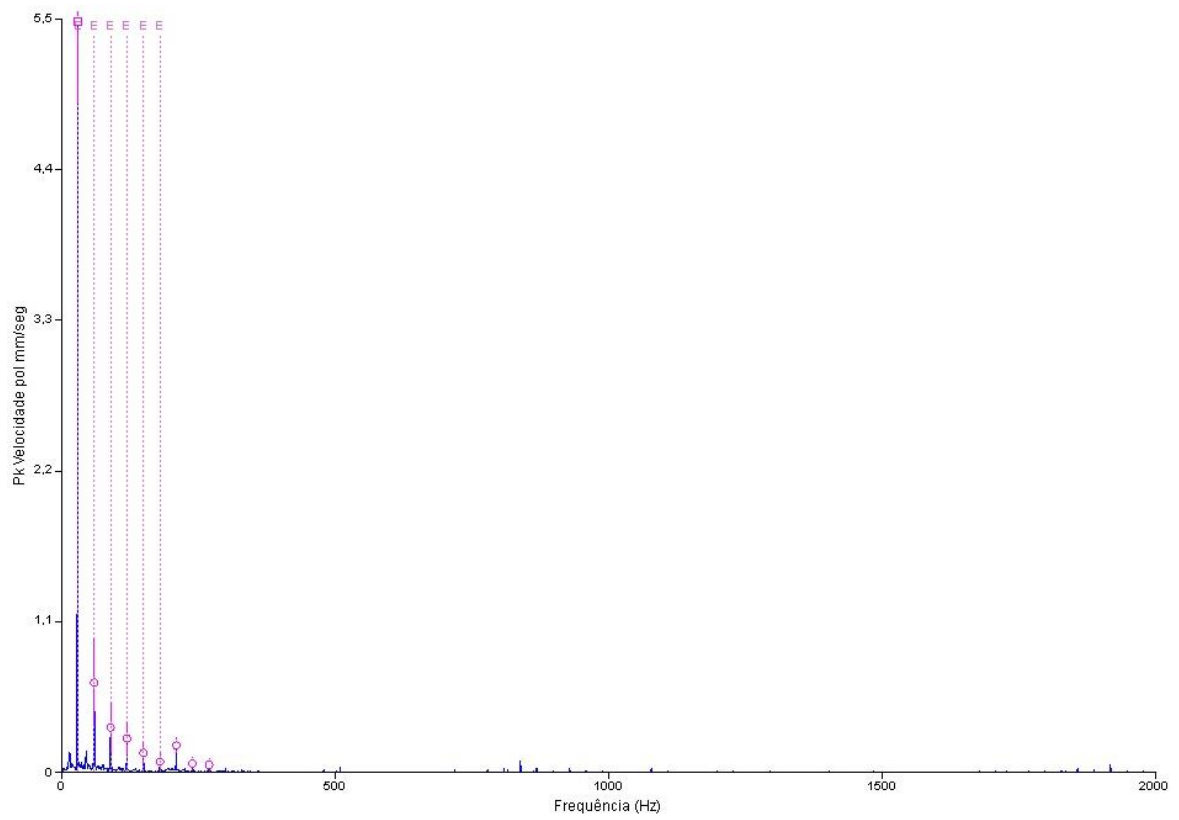
Figura 64 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

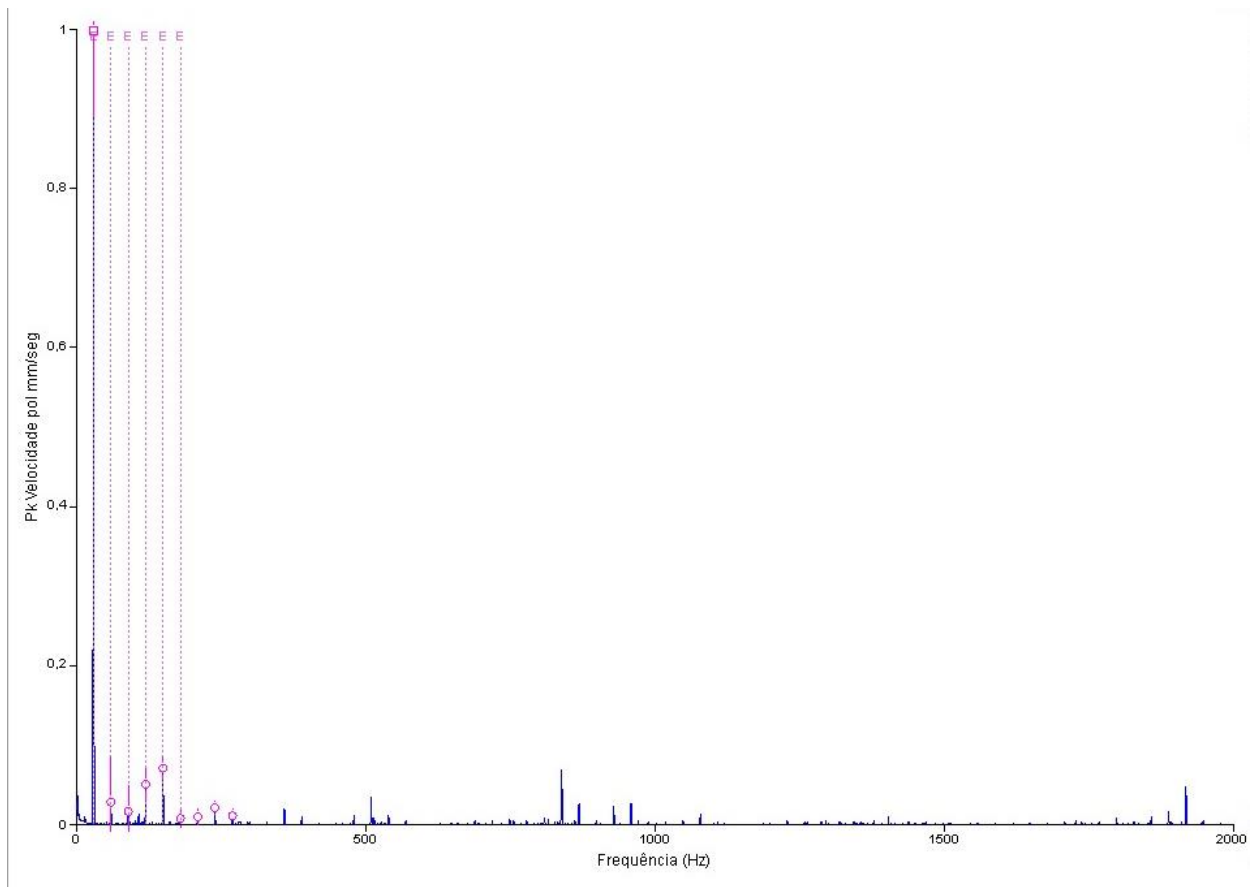
Tabela 11 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LOA - MIT com carga e bornes soltos.

FASE R	FASE S	FASE T
4,189 mm/s	5,113 mm/s	5,456 mm/s

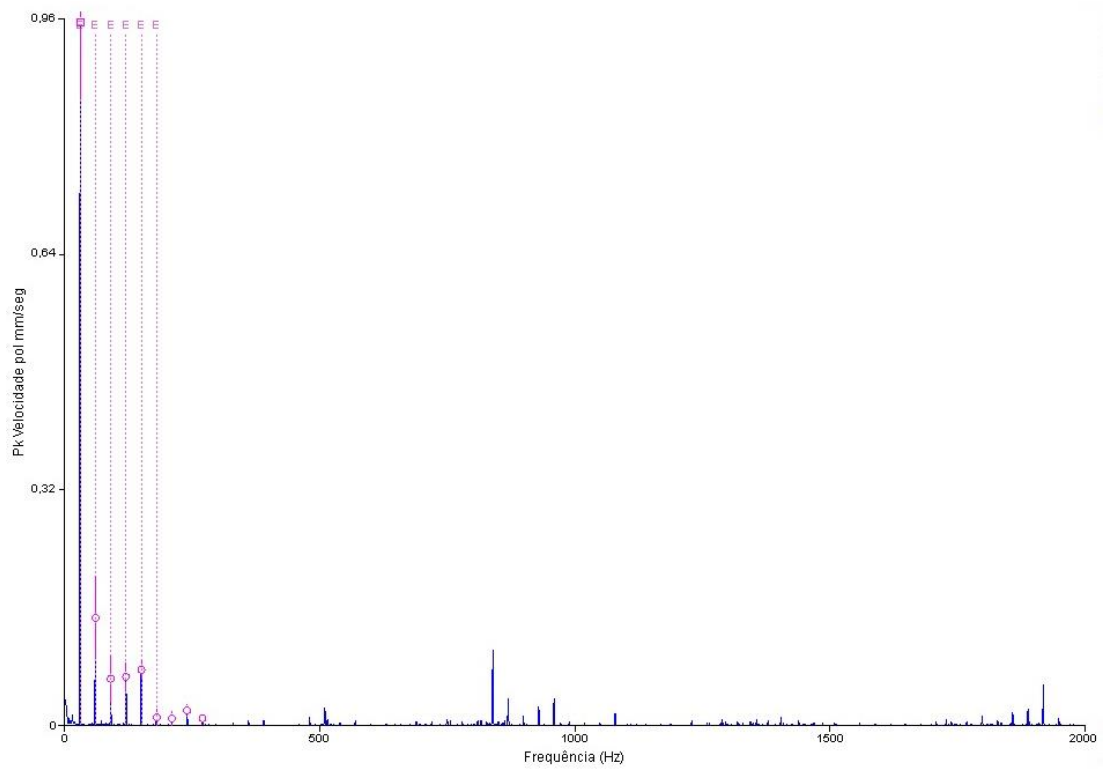
Fonte: Autor.

A Figura 65 (a), (b) e (c), representa o gráfico de espectro no sentido vertical LOA. É possível observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é indicada, conforme a Tabela 12.

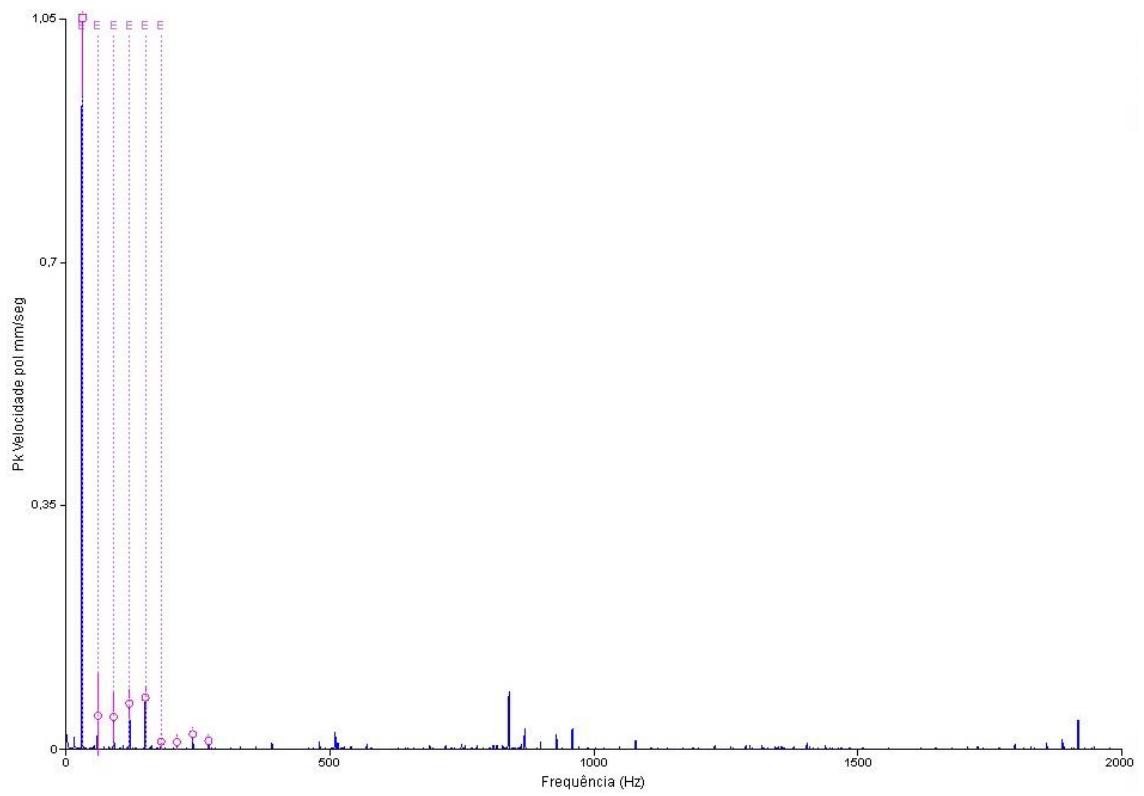
Figura 65 – Gráficos com espectros no sentido vertical LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e bornes soltos.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido vertical LOA - MIT com carga e bornes soltos.

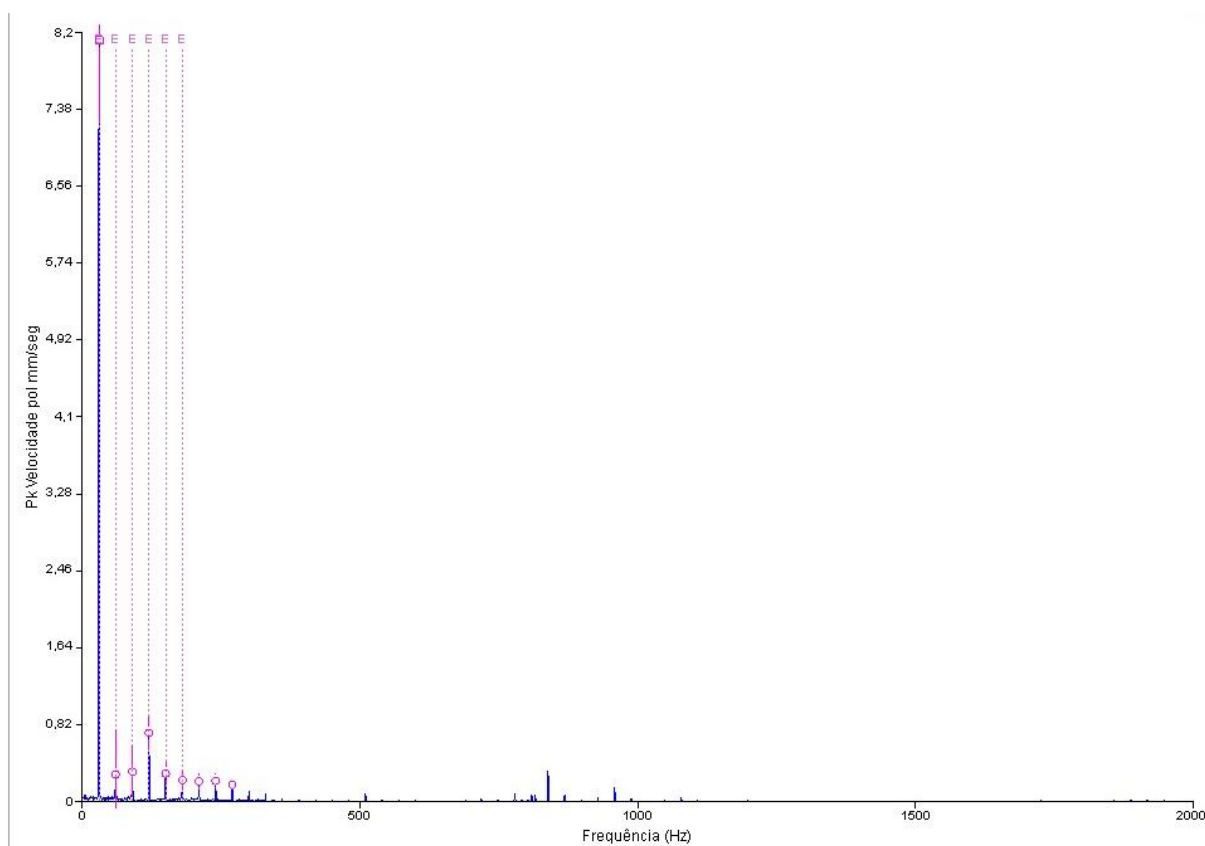
FASE R	FASE S	FASE T
0,994 mm/s	0,951 mm/s	1,047 mm/s

Fonte: Autor.

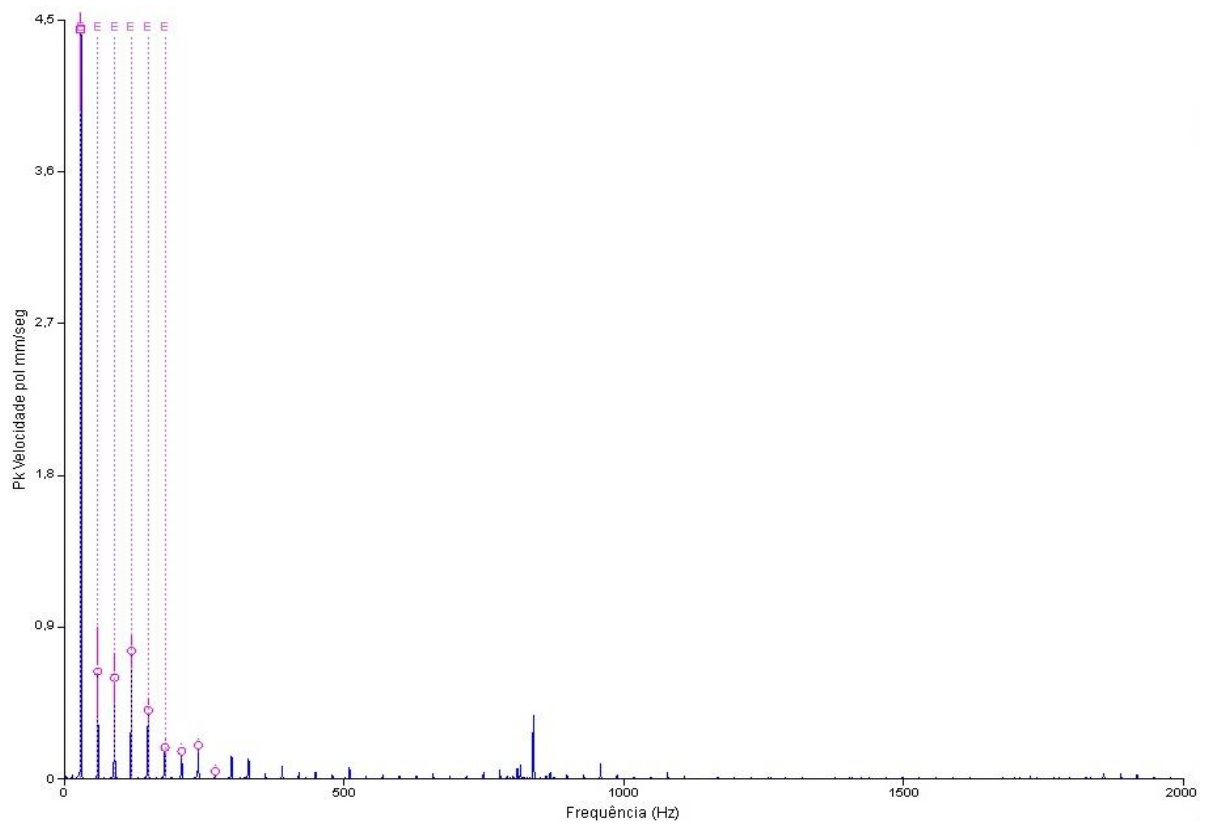
5.1.4 Teste com carga e operação com 2 fases

A 6ª, 7ª e 8ª leitura do motor com carga e operando com duas fases, mostrado na Figura 66 (a), (b) e (c), ilustram as condições do motor operando com a frequência de rotação (*fr*) também igual a 30Hz e com o parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA do motor, com amplitude para as três fases, conforme a Tabela 13.

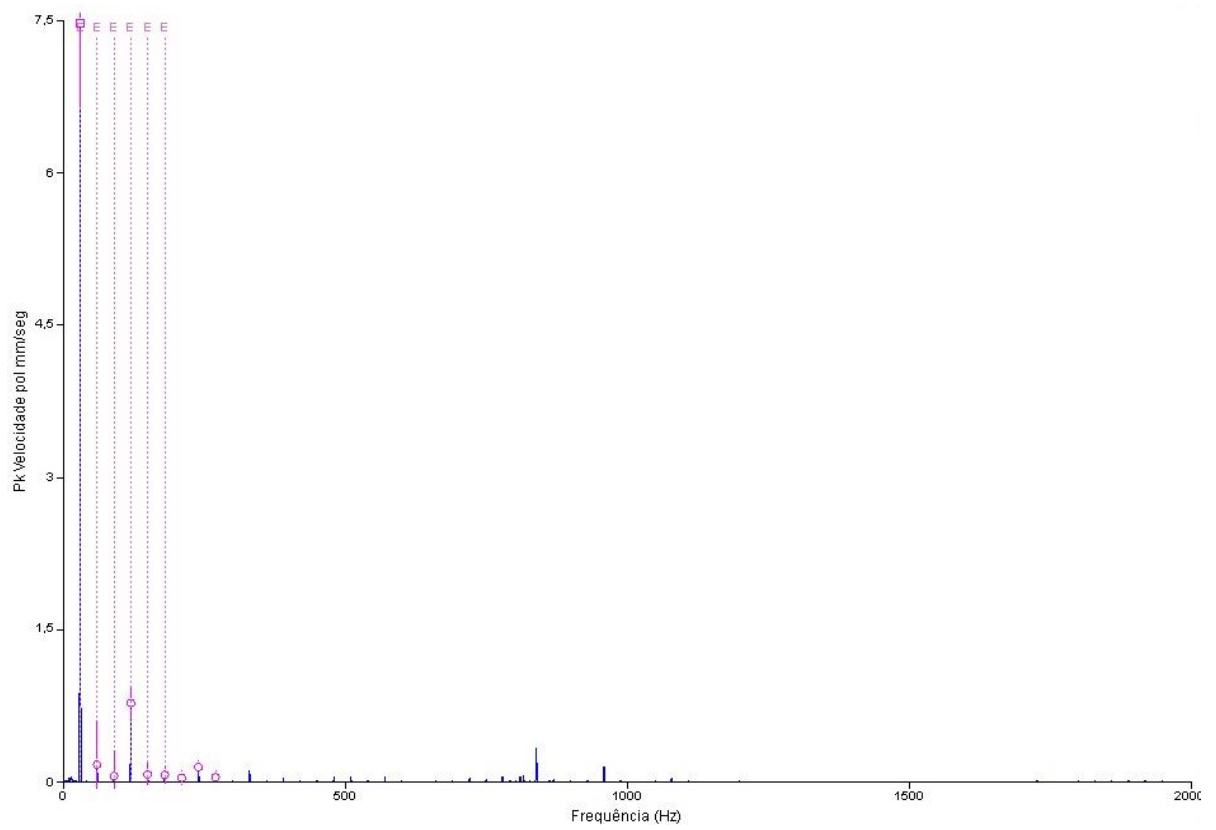
Figura 66 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

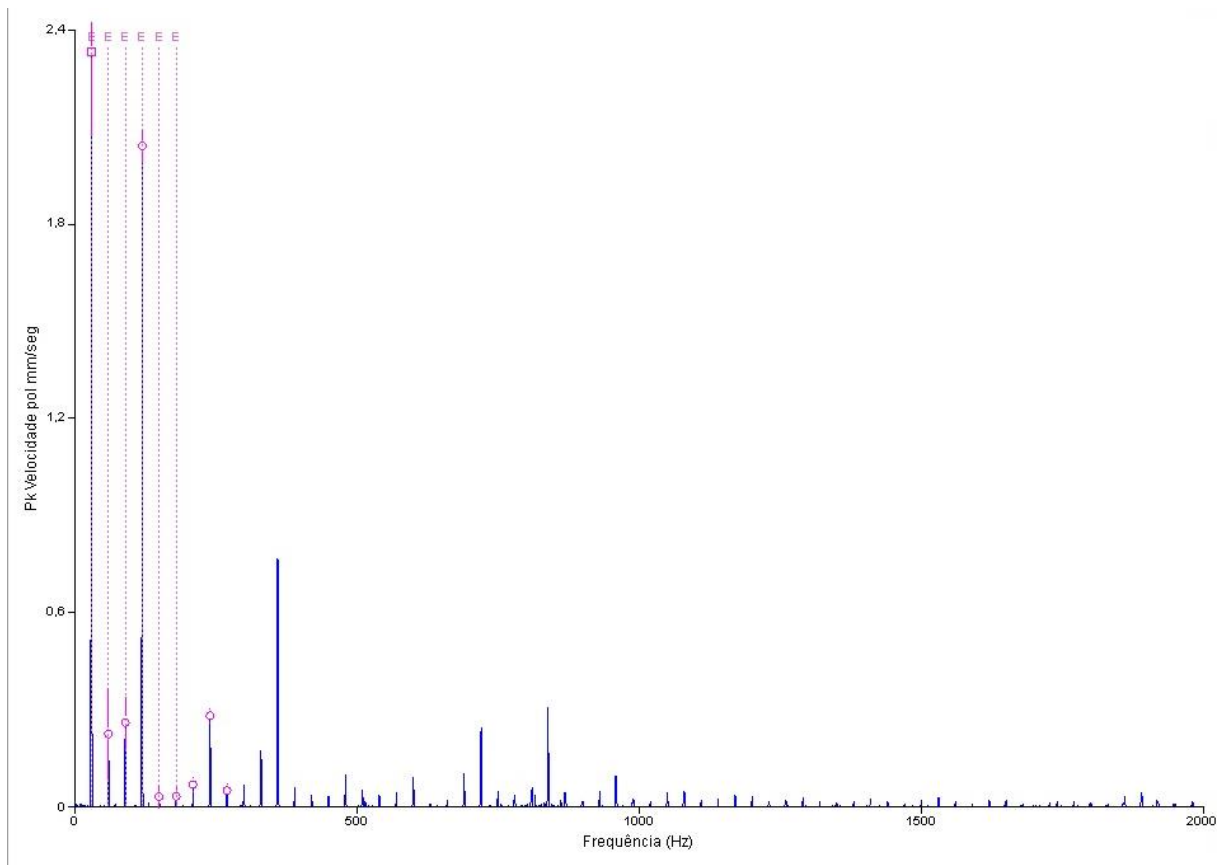
Tabela 13 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA -- MIT com carga e fases soltas.

FASE R	FASE S	FASE T
8,077 mm/s	4,425 mm/s	7,433 mm/s

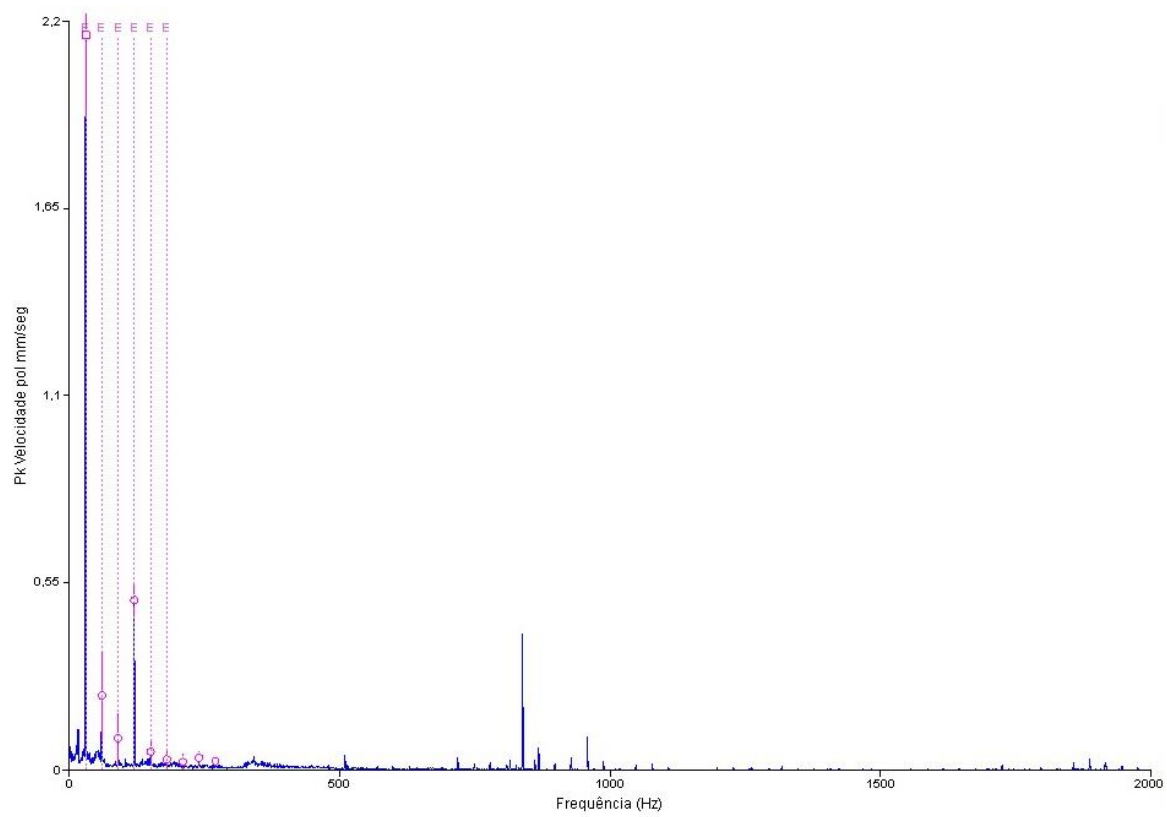
Fonte: Autor.

Na Figura 67 (a), (b) e (c), podemos observar o gráfico de espectro obtido no sentido vertical LA, que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência está apresentada na Tabela 14.

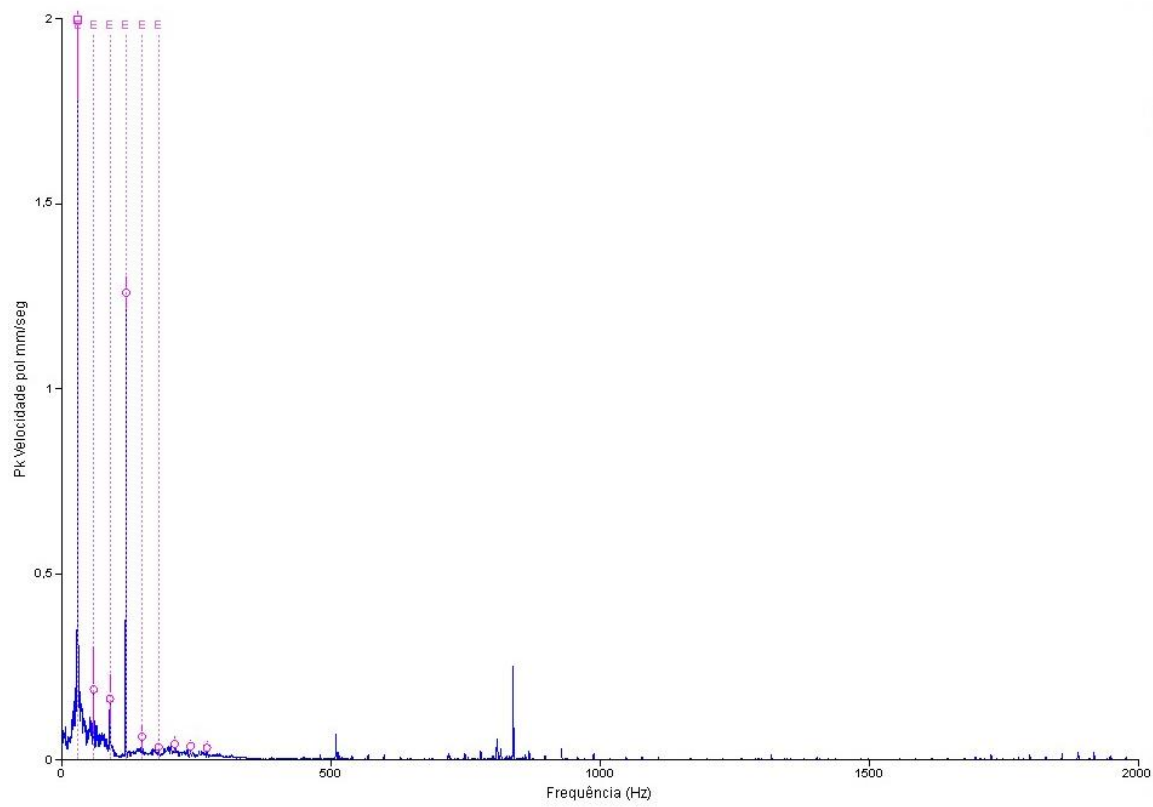
Figura 67 – Gráficos com espectros no sentido vertical LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

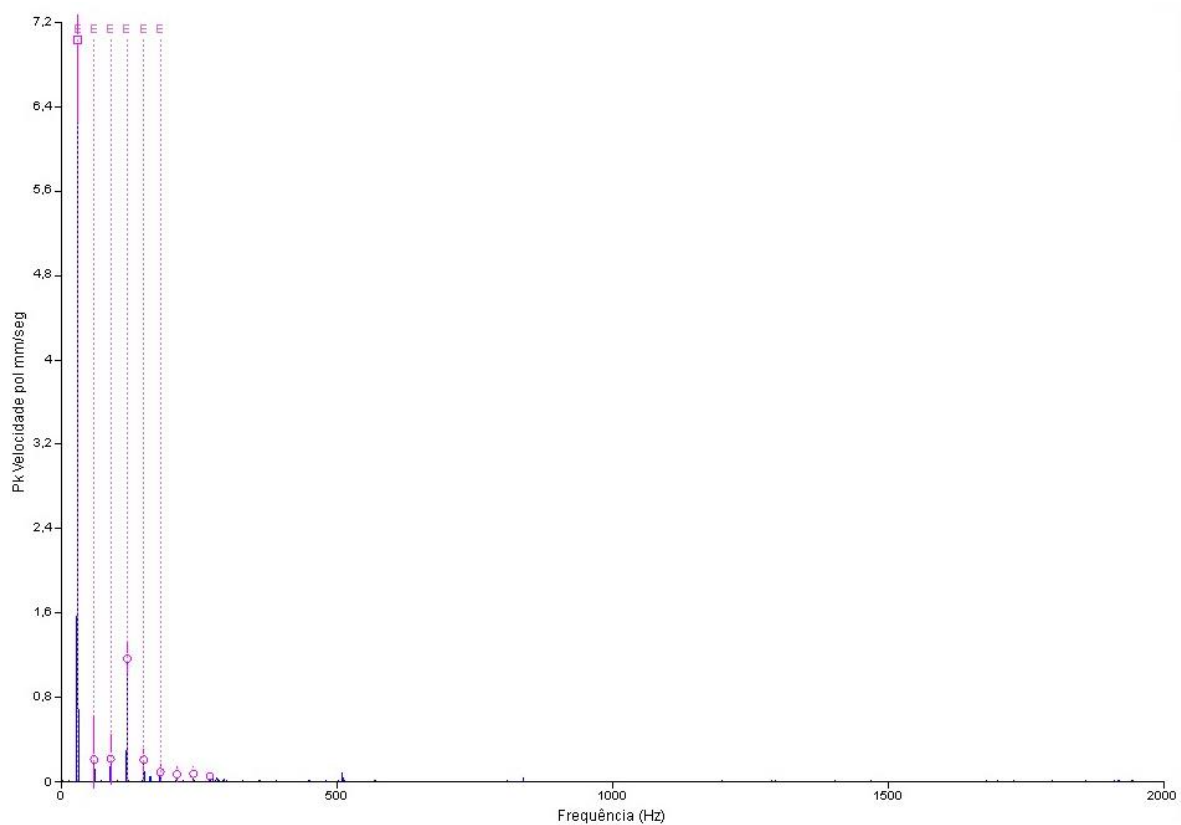
Tabela 14 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA - MIT com carga e fases soltas.

FASE R	FASE S	FASE T
2,320 mm/s	2,148 mm/s	1,987 mm/s

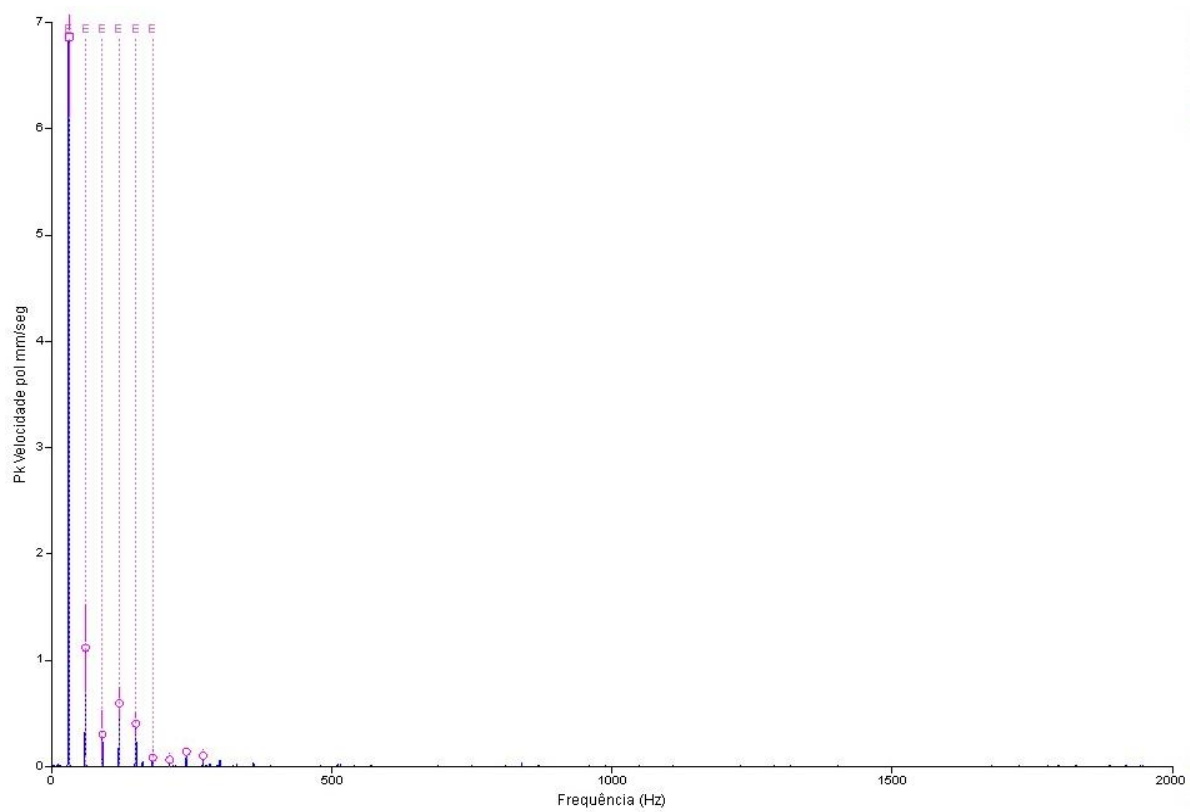
Fonte: Autor.

Na Figura 68 (a), (b) e (c), a medição feita foi no sentido axial LA, através dele podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência está conforme Tabela 15.

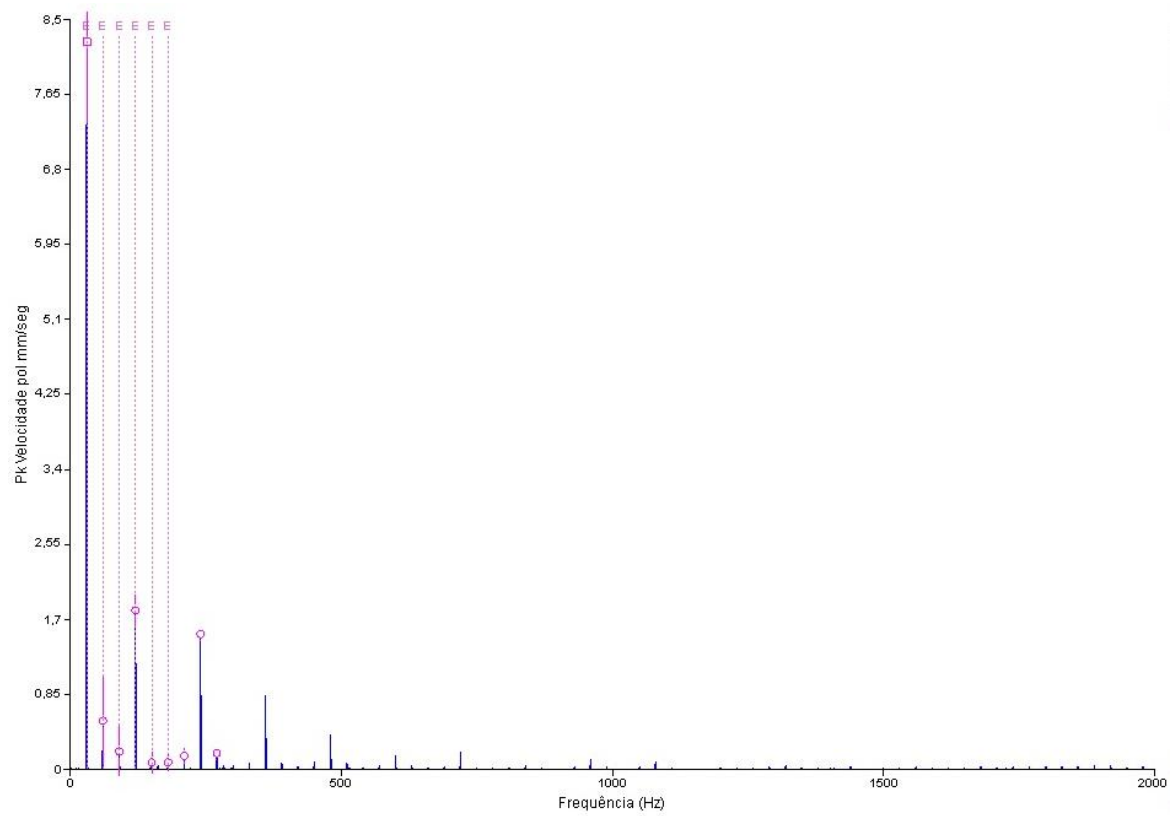
Figura 68 – Gráficos com espectros no sentido axial LA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

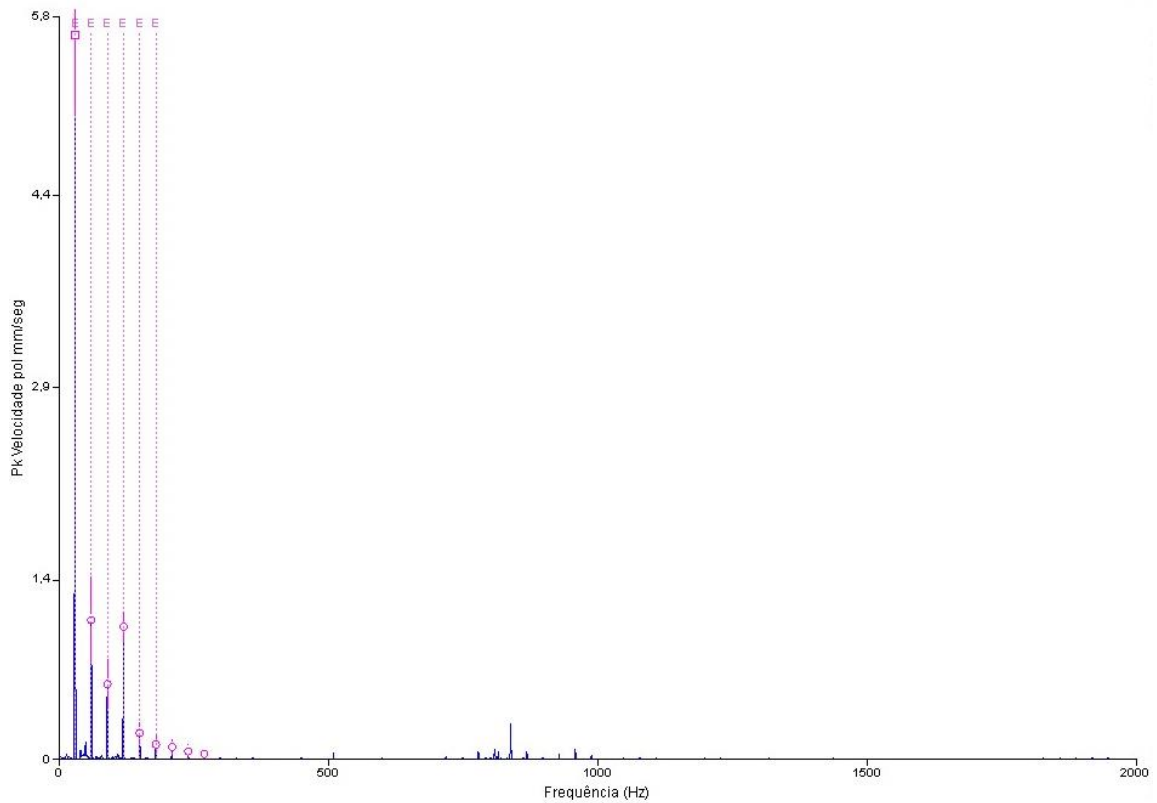
Tabela 15 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido axial LA - MIT com carga e fases soltas.

FASE R	FASE S	FASE T
7,003 mm/s	6,831 mm/s	8,206 mm/s

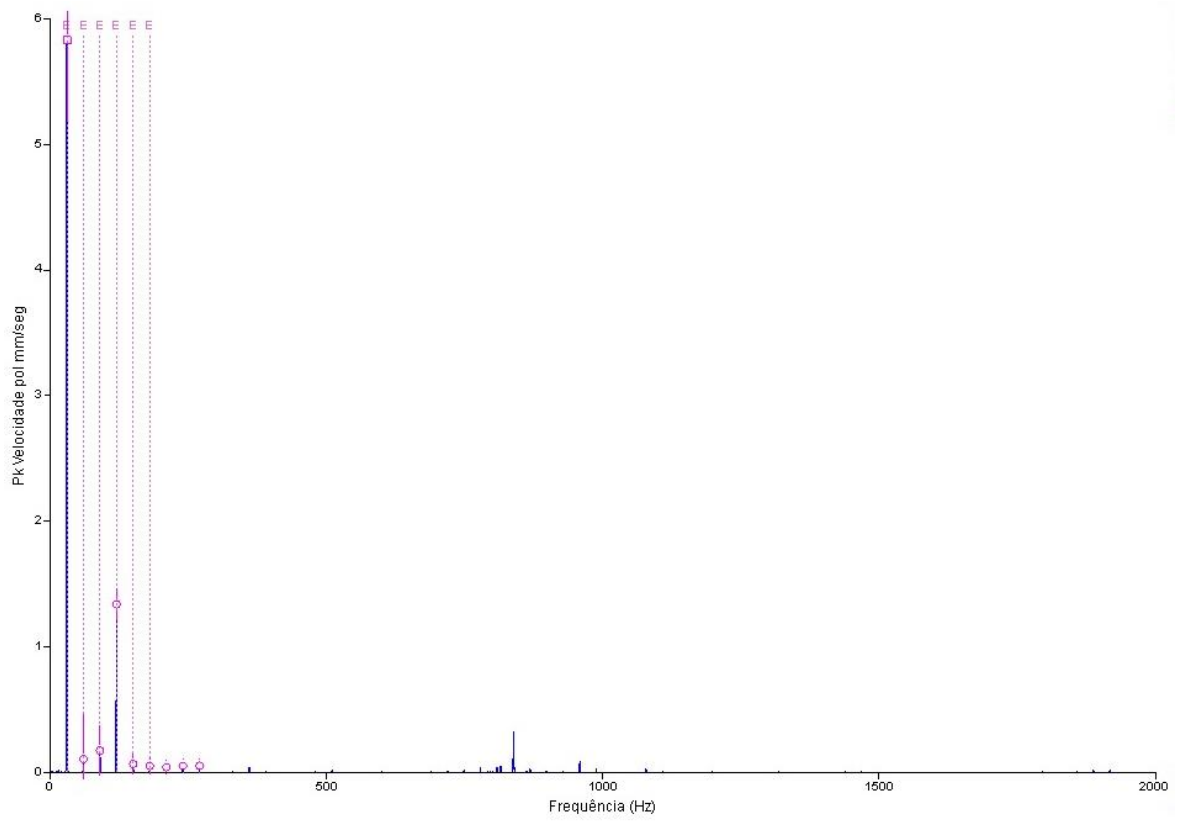
Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, conforme a Figura 69 (a), (b) e (c), podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência está apresentada na Tabela 16.

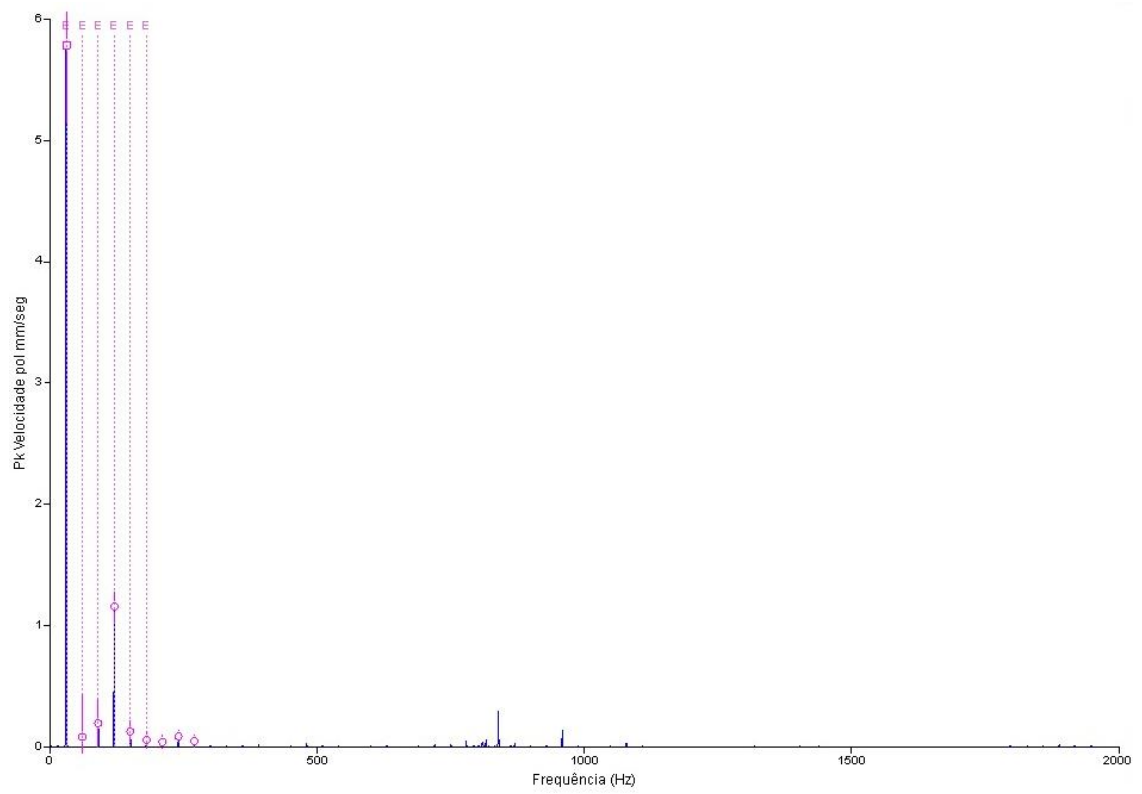
Figura 69 – Gráficos com espectros no sentido horizontal LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

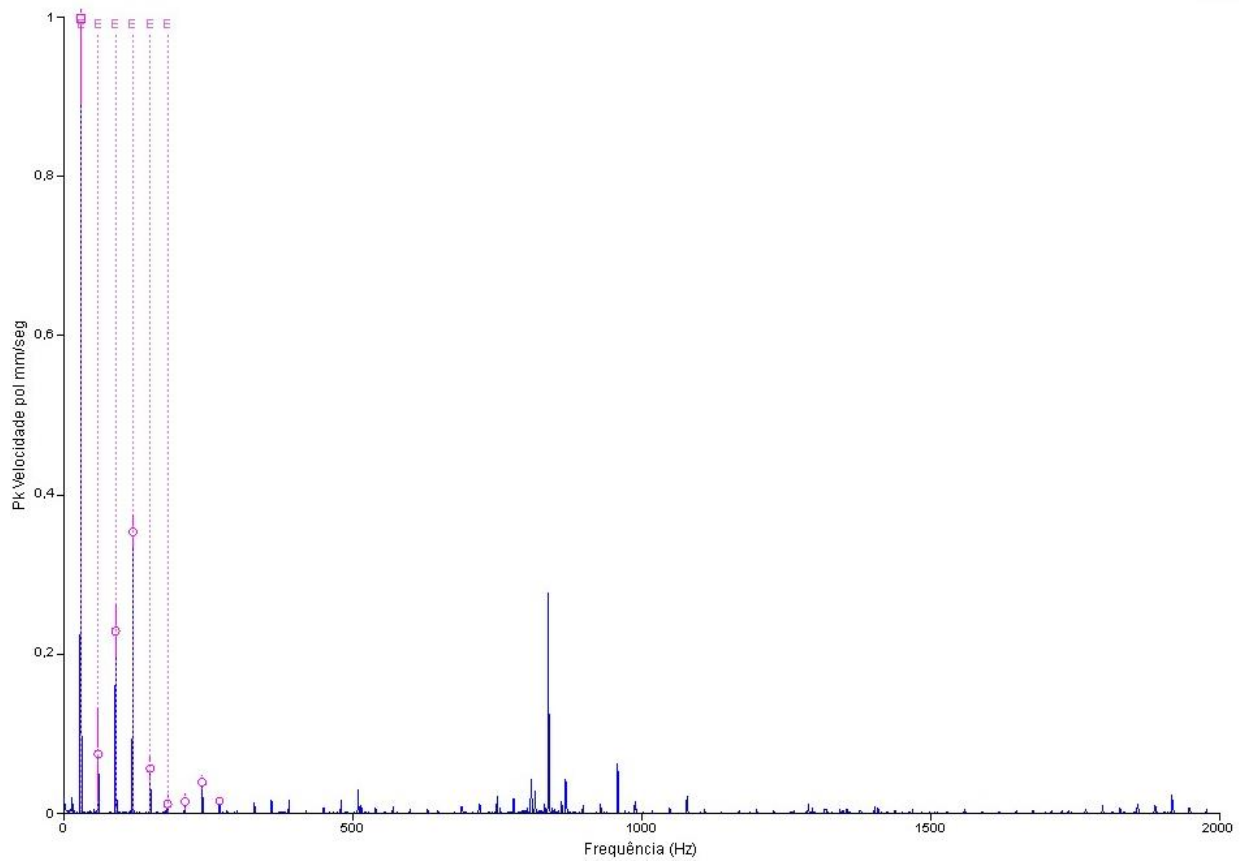
Tabela 16 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LOA - MIT com carga e fases soltas.

FASE R	FASE S	FASE T
5,628 mm/s	5,800 mm/s	5,757 mm/s

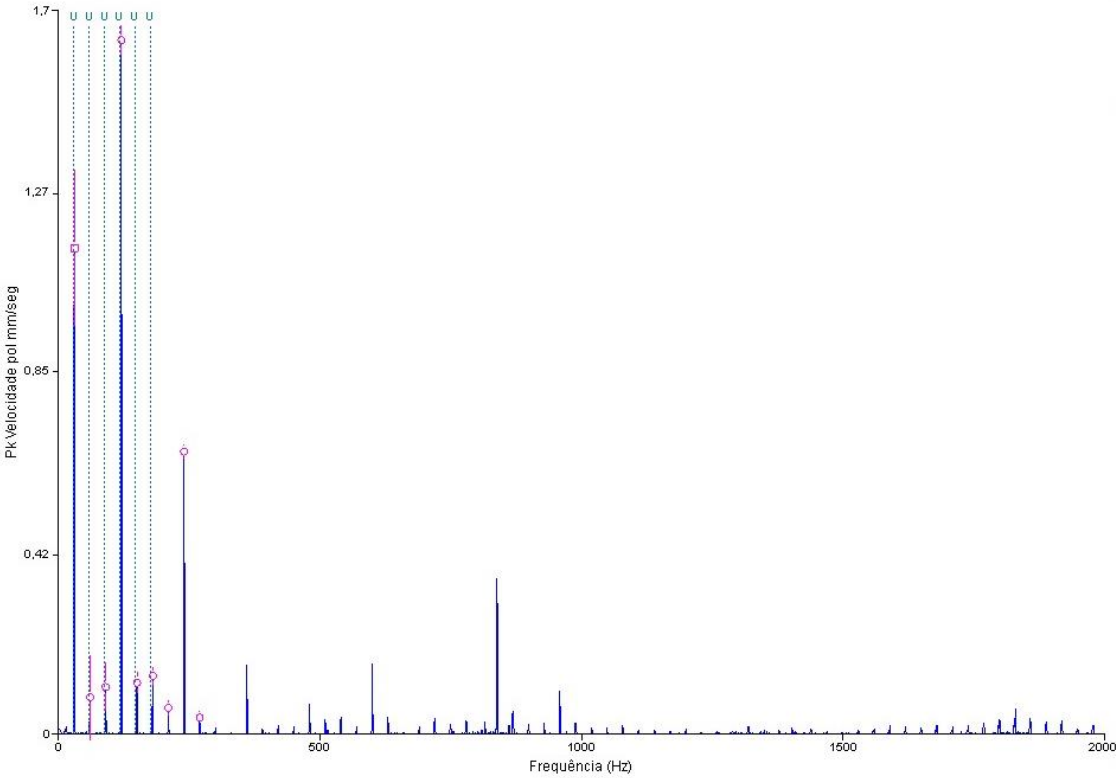
Fonte: Autor.

A Figura 70 (a), (b) e (c), representa o gráfico de espectro no sentido vertical LOA, onde é possível observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é apresentada na Tabela 17.

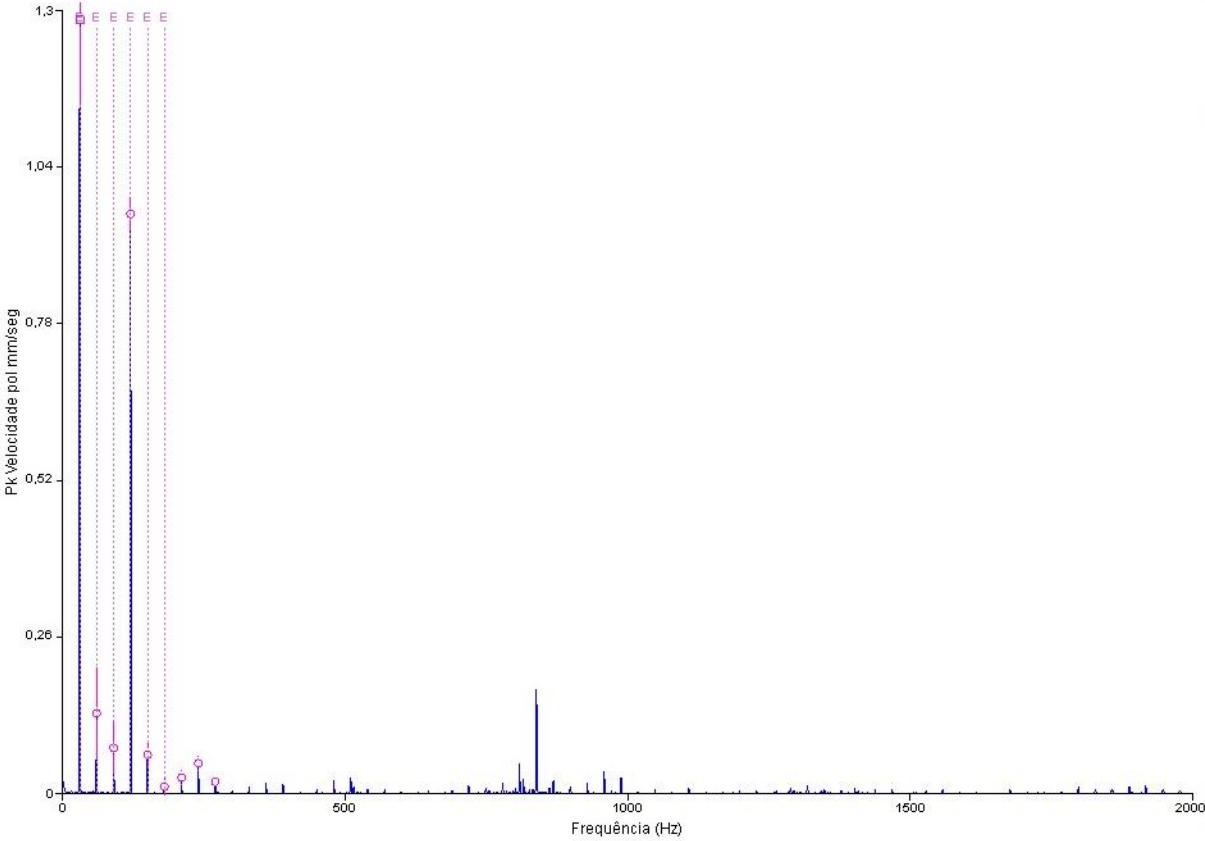
Figura 70 – Gráficos com espectros no sentido vertical LOA fases R (a), S (b) e T (c) - MIT com carga e fases soltas.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

Tabela 17 – Amplitude do parâmetro velocidade RMS no sentido vertical LOA T - MIT com carga e fases soltas.

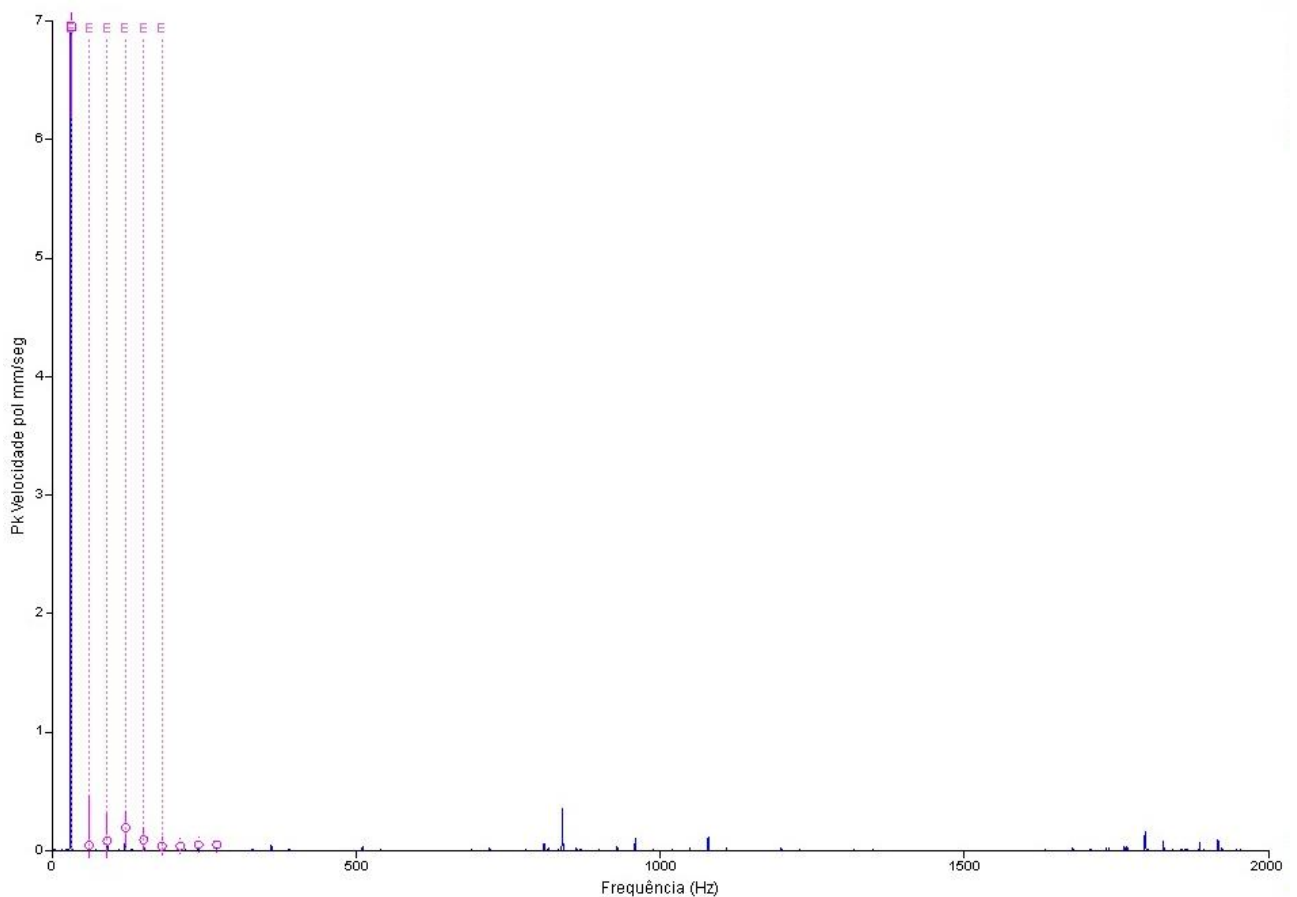
FASE R	FASE S	FASE T
0,994 mm/s	1,133 mm/s	1,278 mm/s

Fonte: Autor.

5.1.5 Torção de carcaça

Na Figura 71 é representada a 9ª leitura com torção da tampa do motor. Este gráfico ilustra as condições do motor operando na frequência de rotação (***fr***) de 30Hz, onde podemos observar que no parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA do motor, está apresentando uma amplitude de 6,917 mm/s.

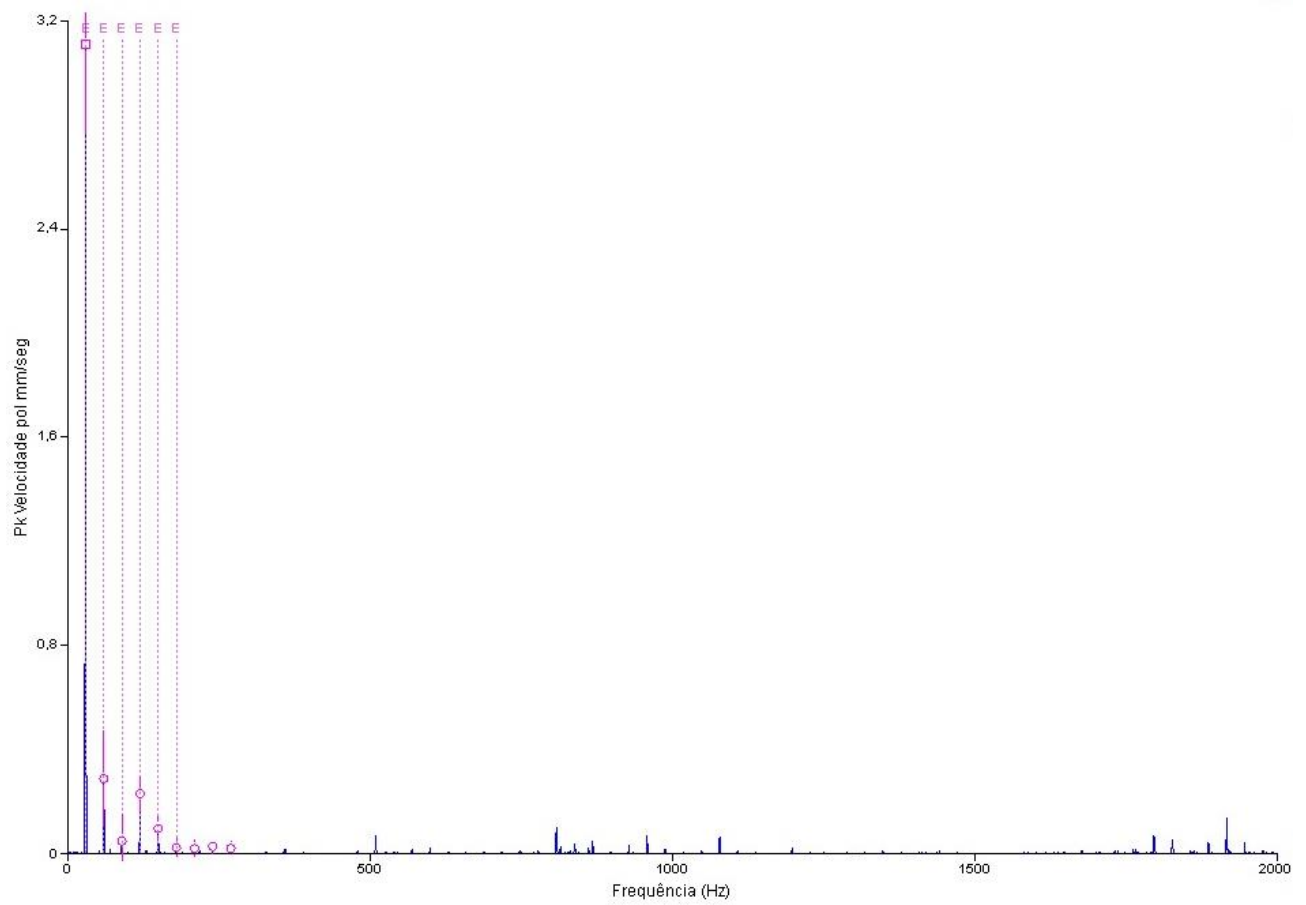
Figura 71 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga e torção na tampa.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LA, conforme Figura 72, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 3,093 mm/s.

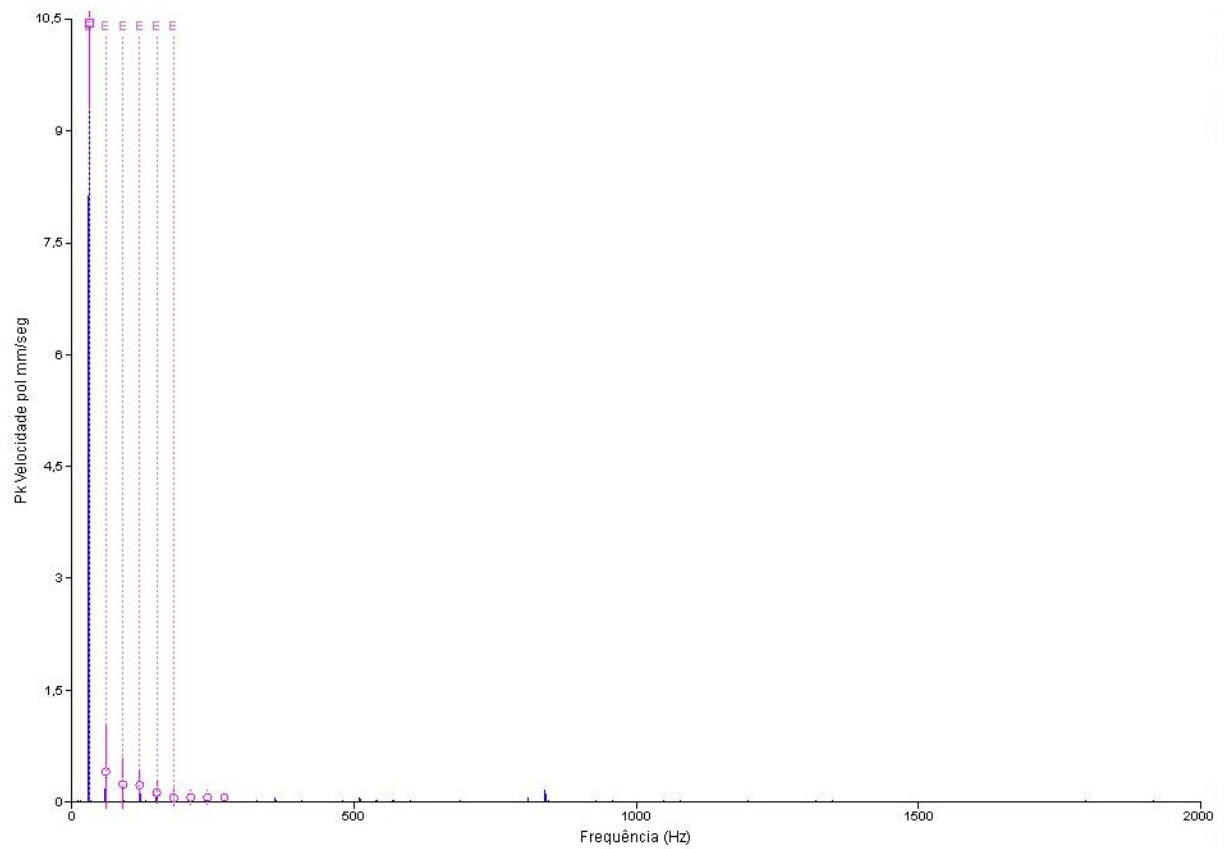
Figura 72 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT com carga e torção na tampa.



Fonte: Autor.

No sentido axial LA, ilustrado na Figura 73, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 10,40 mm/s.

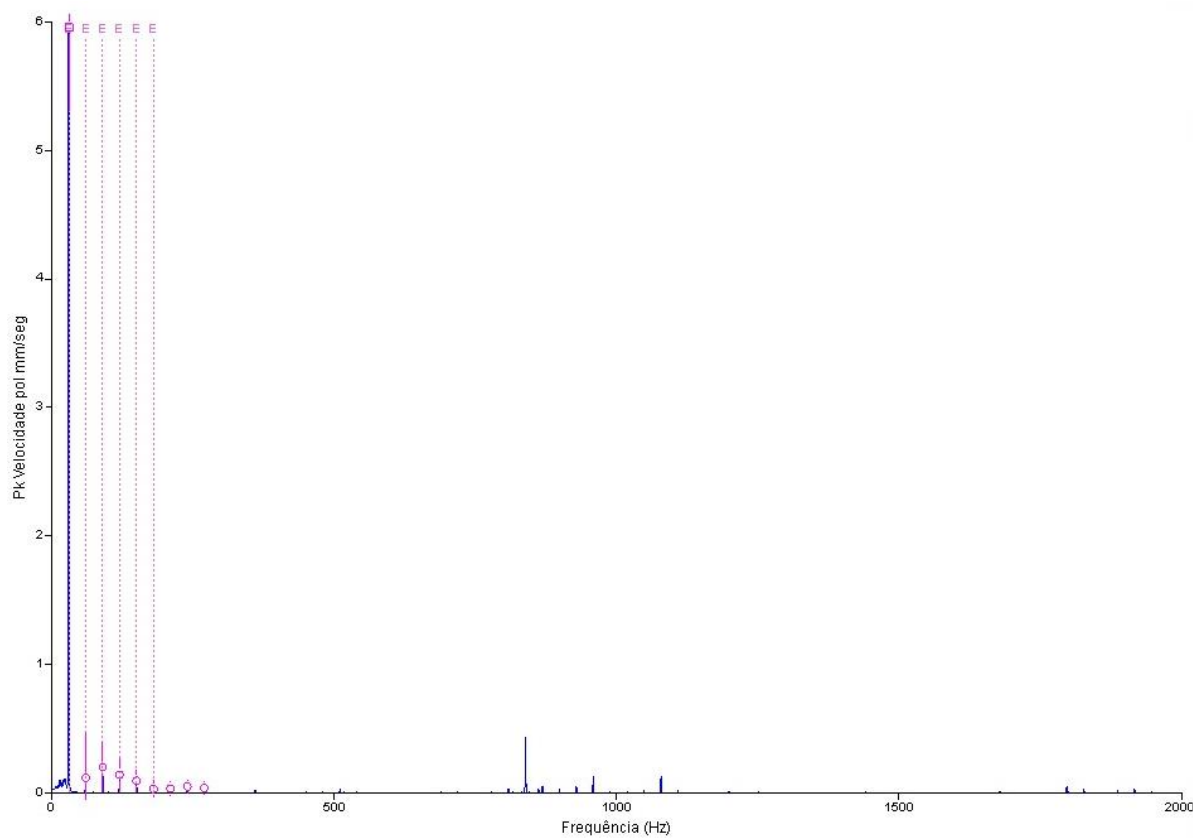
Figura 73 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga e torção na tampa.



Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, conforme a Figura 74, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 5,929 mm/s.

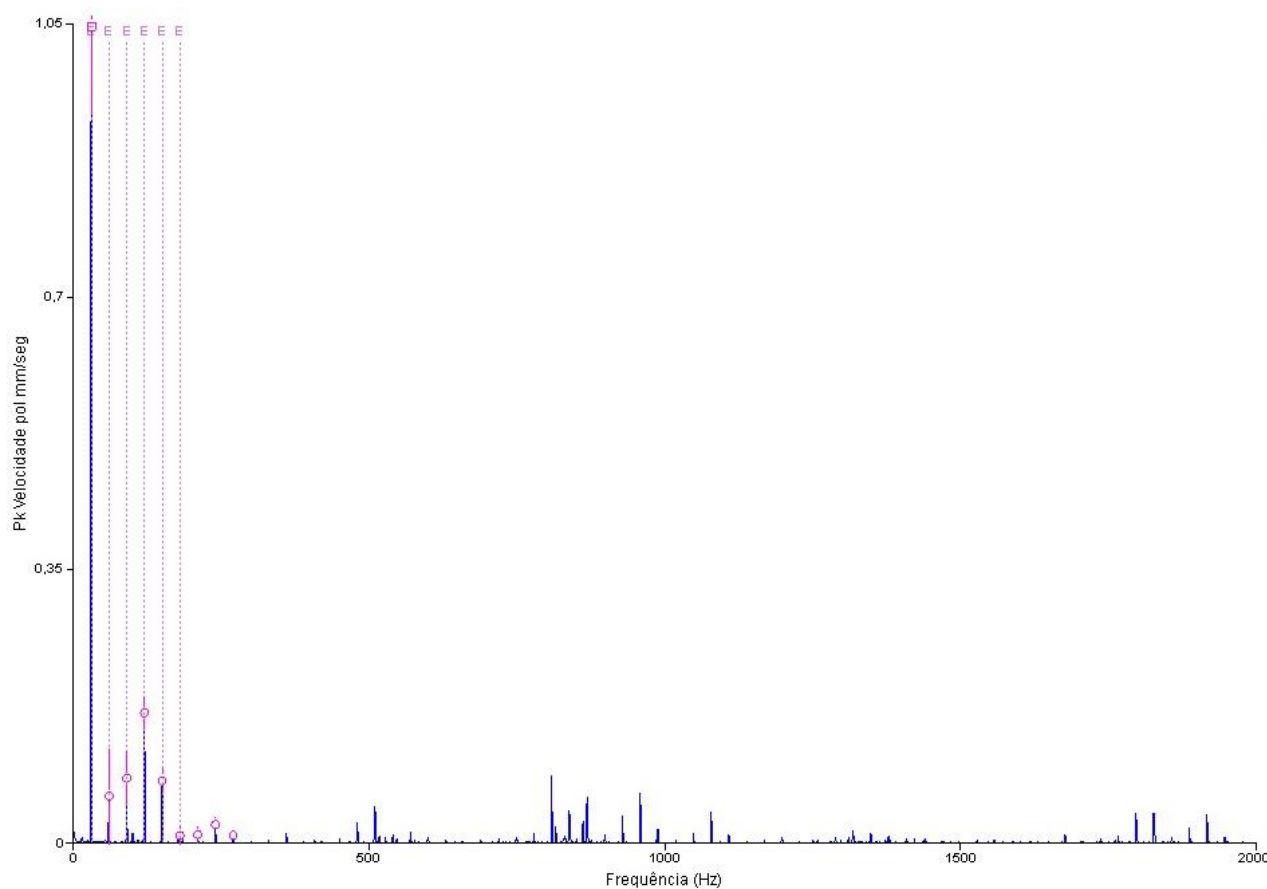
Figura 74 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga e torção na tampa.



Fonte: Autor.

Já no sentido vertical LOA, conforme Figura 75, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 1,042 mm/s.

Figura 75 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT com carga e torção na tampa.

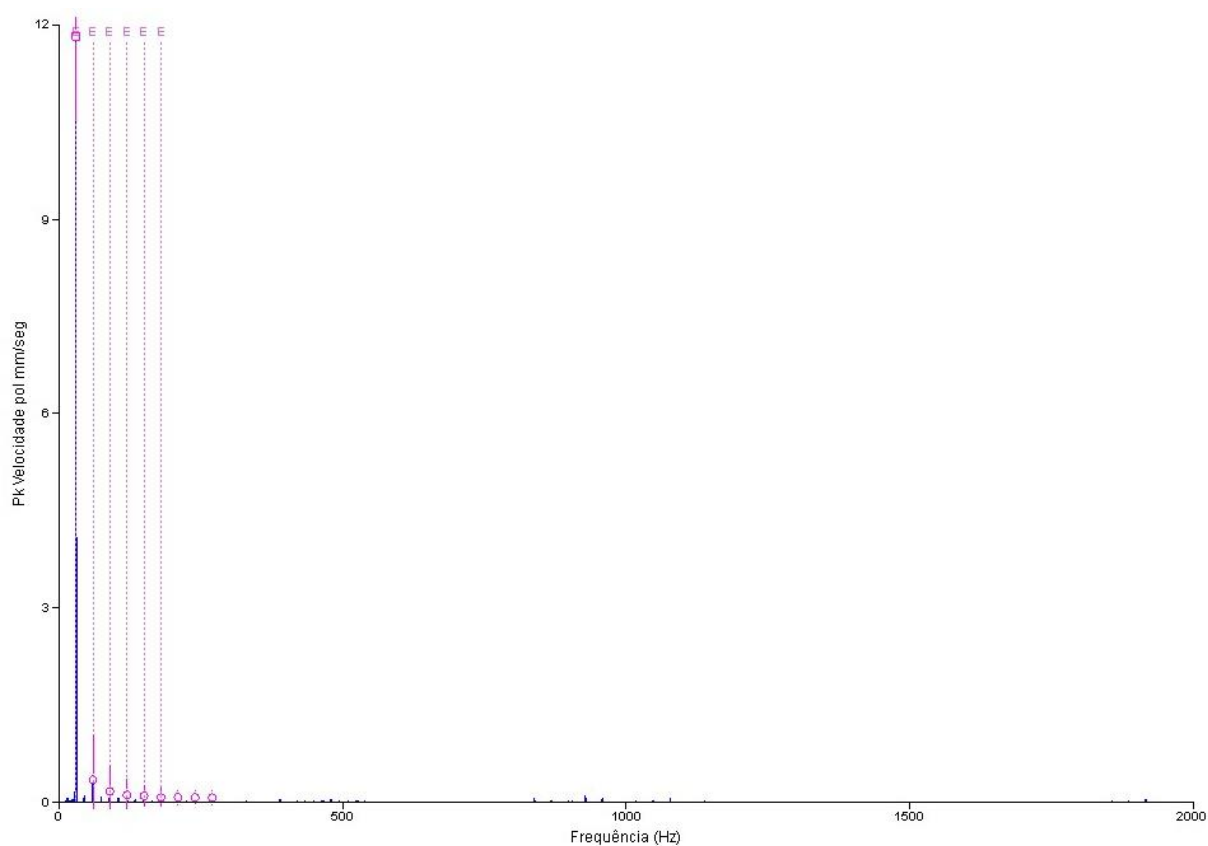


Fonte: Autor.

5.1.6 Abertura na barra do estator

Na Figura 76 está representada a 10ª leitura com a carga acoplada ao eixo e uma abertura no em uma barra do estator e com motor operando na frequência de rotação (***fr***) de 30Hz, onde pode-se observar que no parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA do motor, está apresentando uma amplitude de 11,77 mm/s.

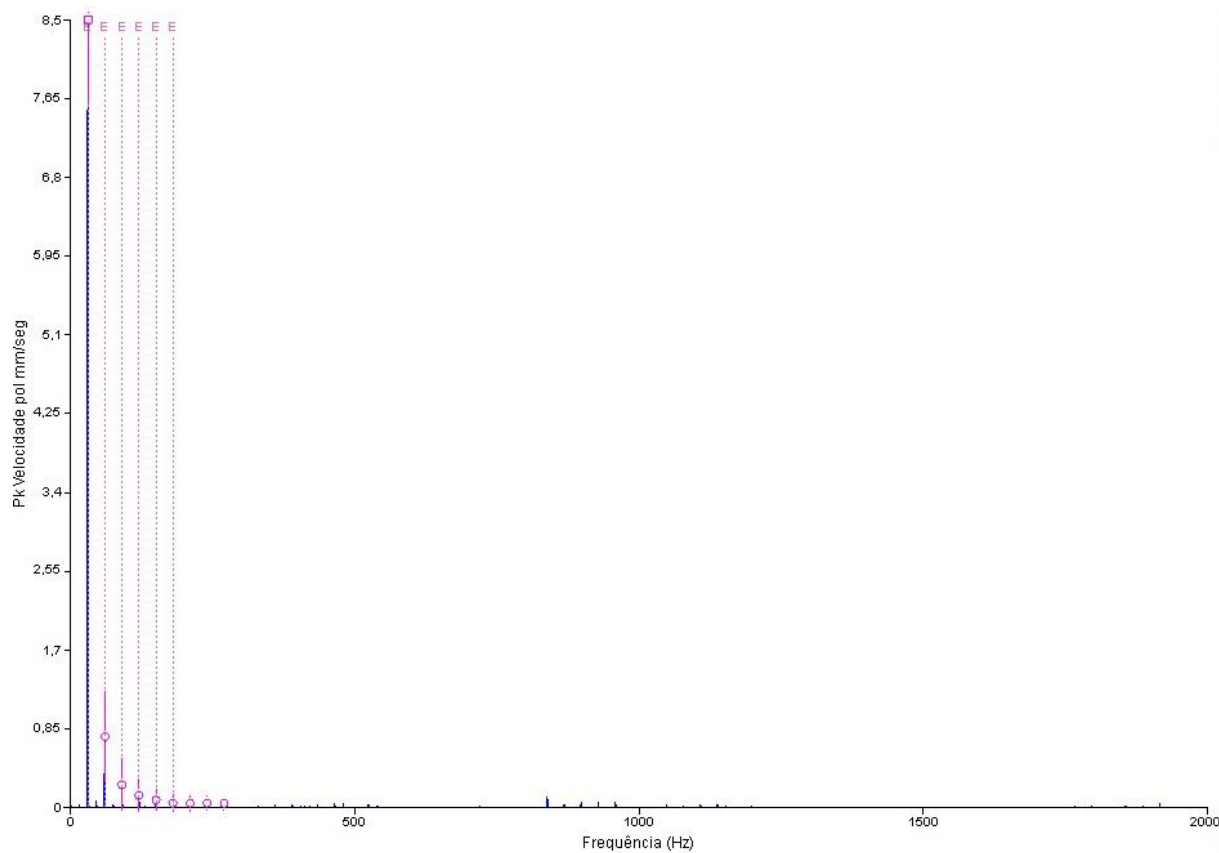
Figura 76 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga e barra do estator com abertura.



Fonte: Autor.

Já no sentido vertical LA, conforme mostrado na Figura 77, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 8,464 mm/s.

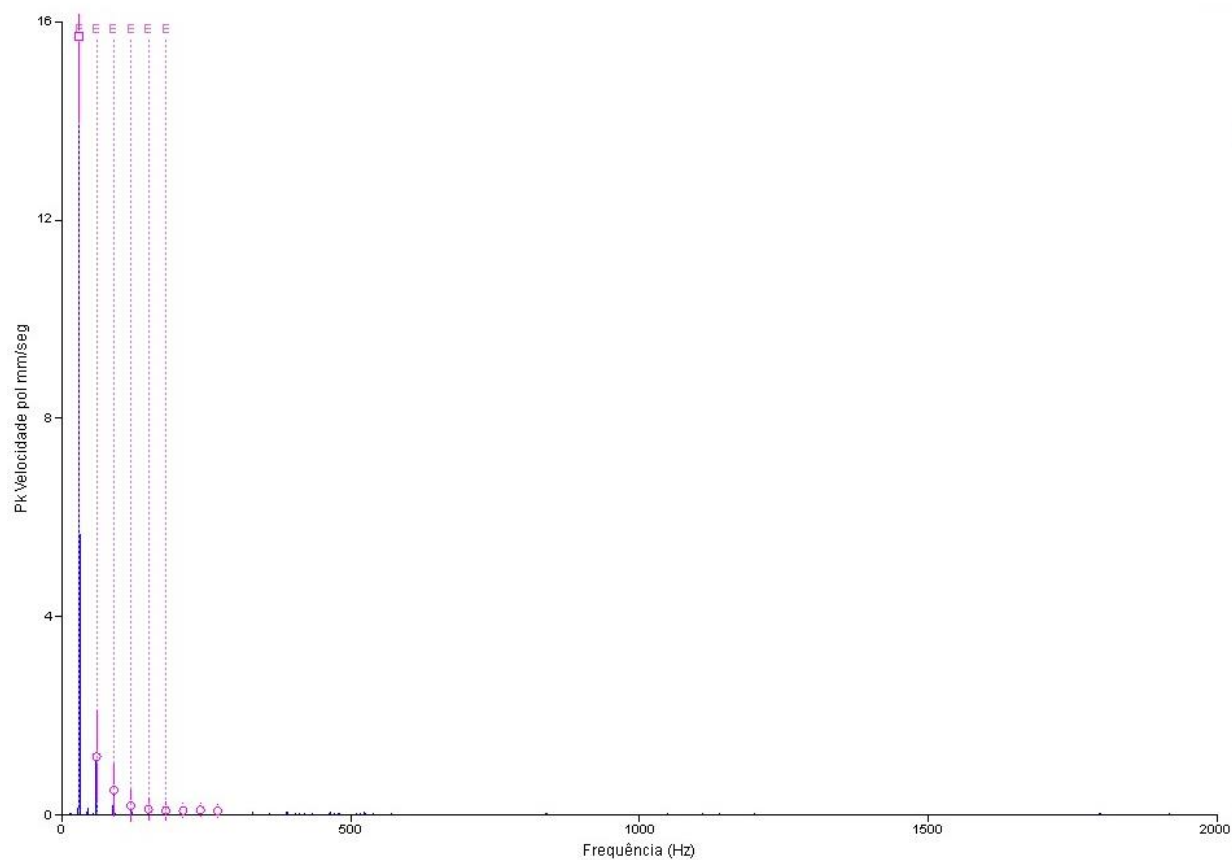
Figura 77 – Gráfico com espectro sentido Vertical LA - MIT com carga e barra do estator com abertura.



Fonte: Autor.

No sentido axial LA, conforme a Figura 78, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 15,64mm/s.

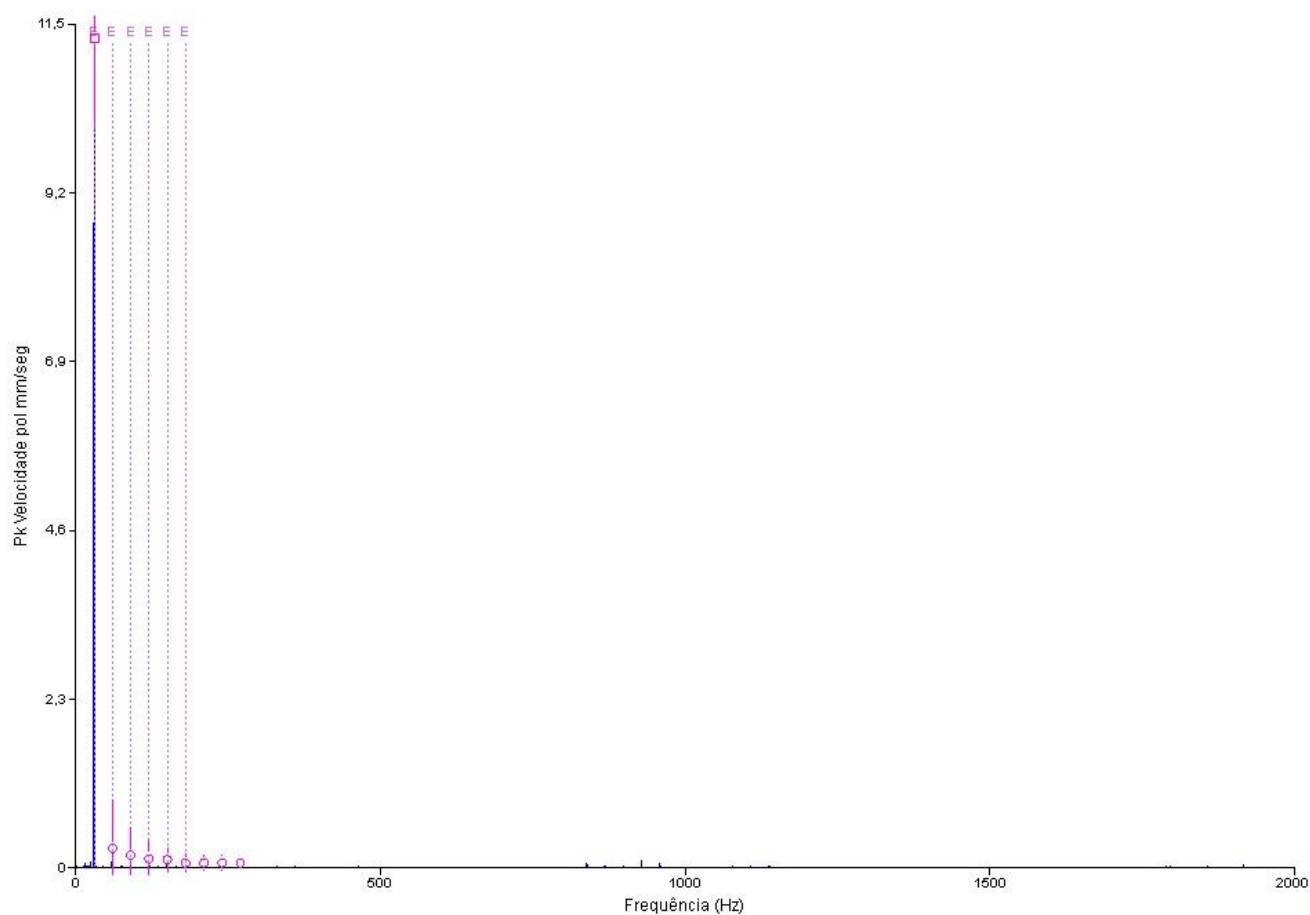
Figura 78 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga e barra do estator com abertura.



Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, conforme Figura 79, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 11,26 mm/s.

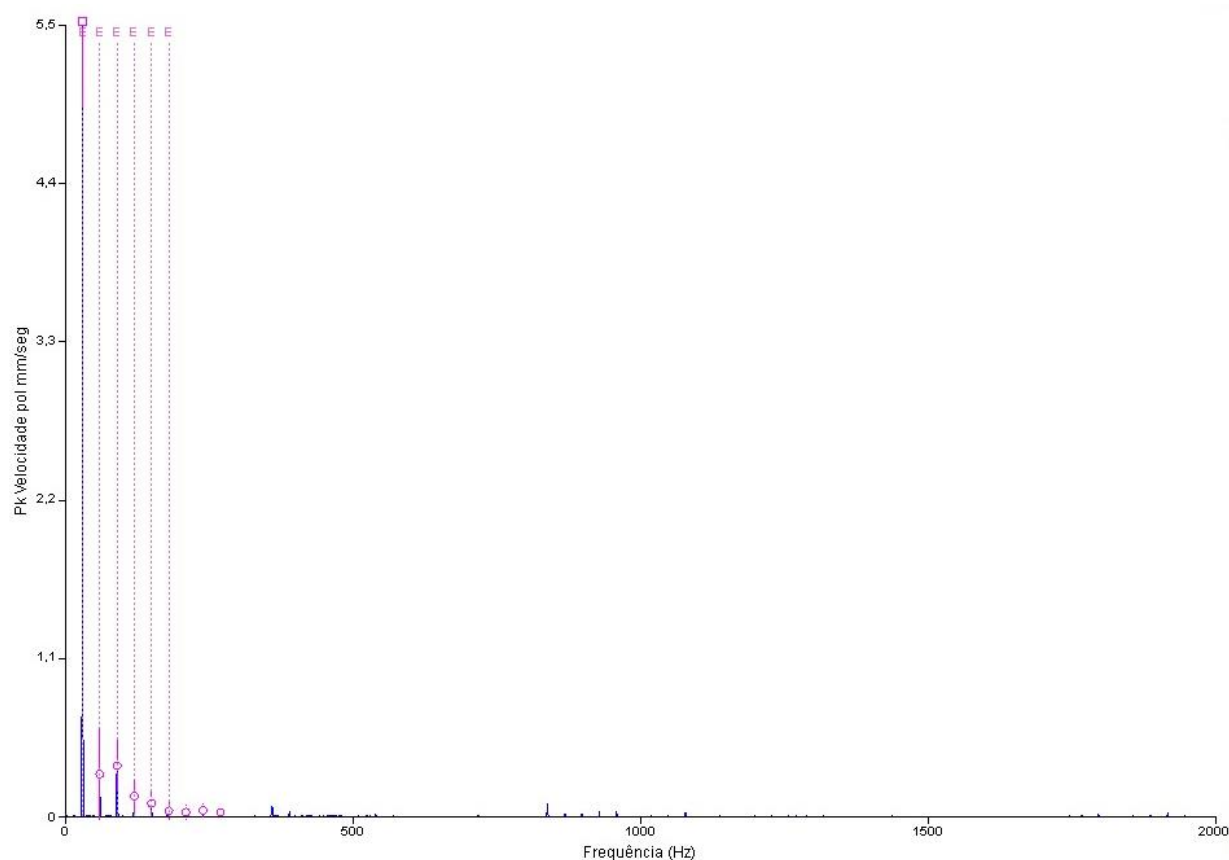
Figura 79 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga e barra do estator com abertura.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LOA, ilustrado na Figura 80, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 5,499 mm/s.

Figura 80 – Gráfico com espectro sentido Vertical LOA - MIT com carga e barra do estator com abertura.

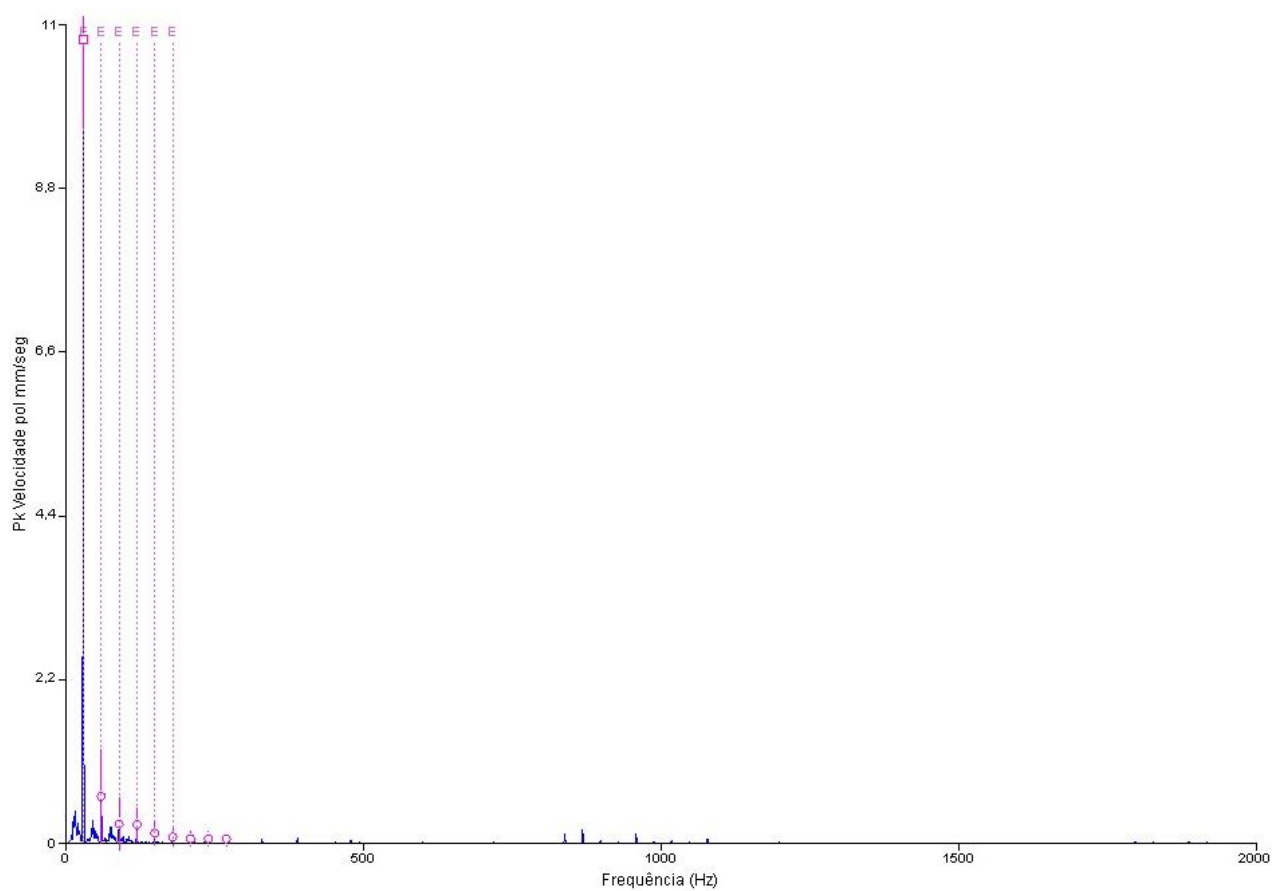


Fonte: Autor.

5.1.7 Abertura na barra e rompimento de um filamento da bobina do estator

Na Figura 81 é representada a 11ª leitura com a carga acoplada ao eixo, uma abertura em uma barra do estator e uma bobina rompida. Nesse gráfico são ilustradas as condições com motor operando na frequência de rotação (fr) de 30Hz e, onde podemos observar que no parâmetro velocidade RMS no sentido horizontal LA do motor, está apresentando uma amplitude de 10,74 mm/s.

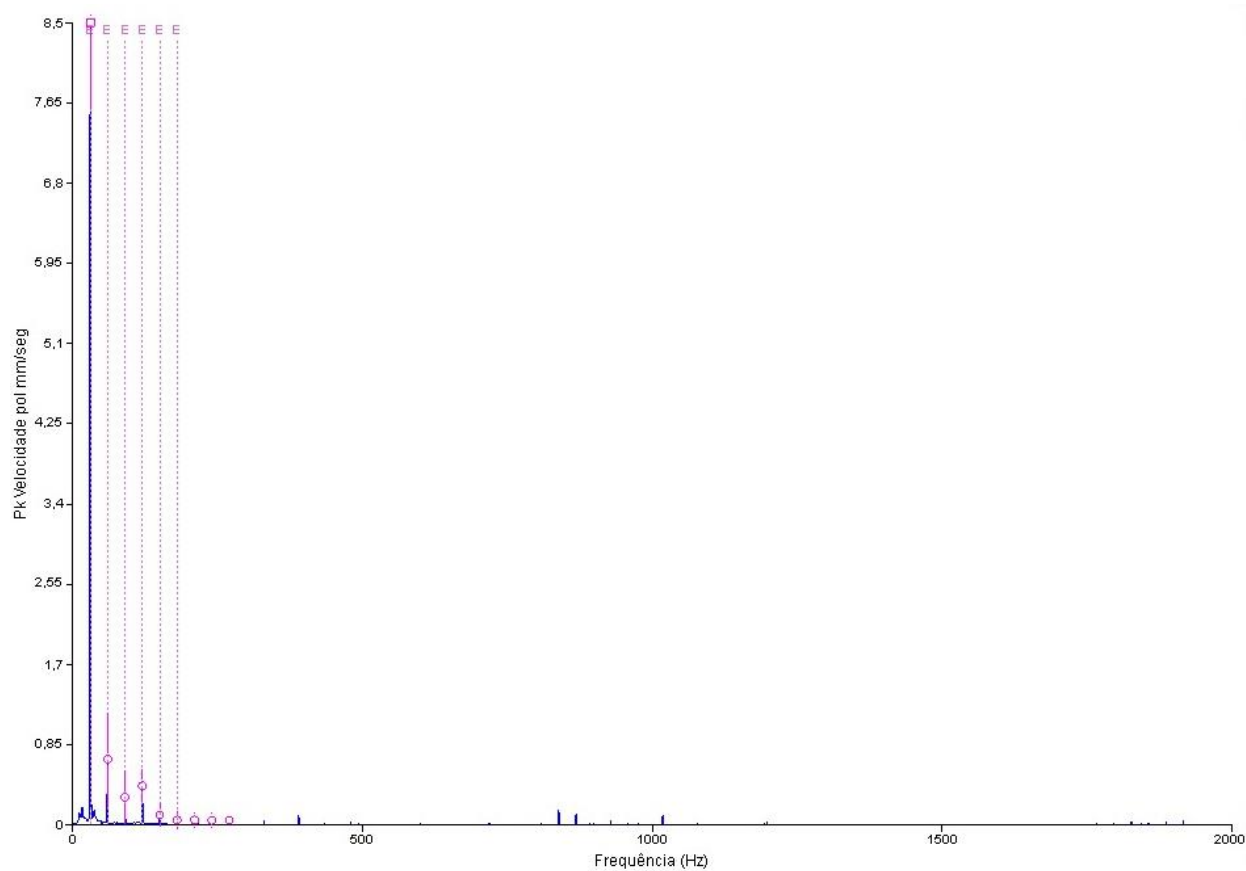
Figura 81 – Gráfico com espectro sentido horizontal LA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LA, conforme Figura 82, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 8,464 mm/s.

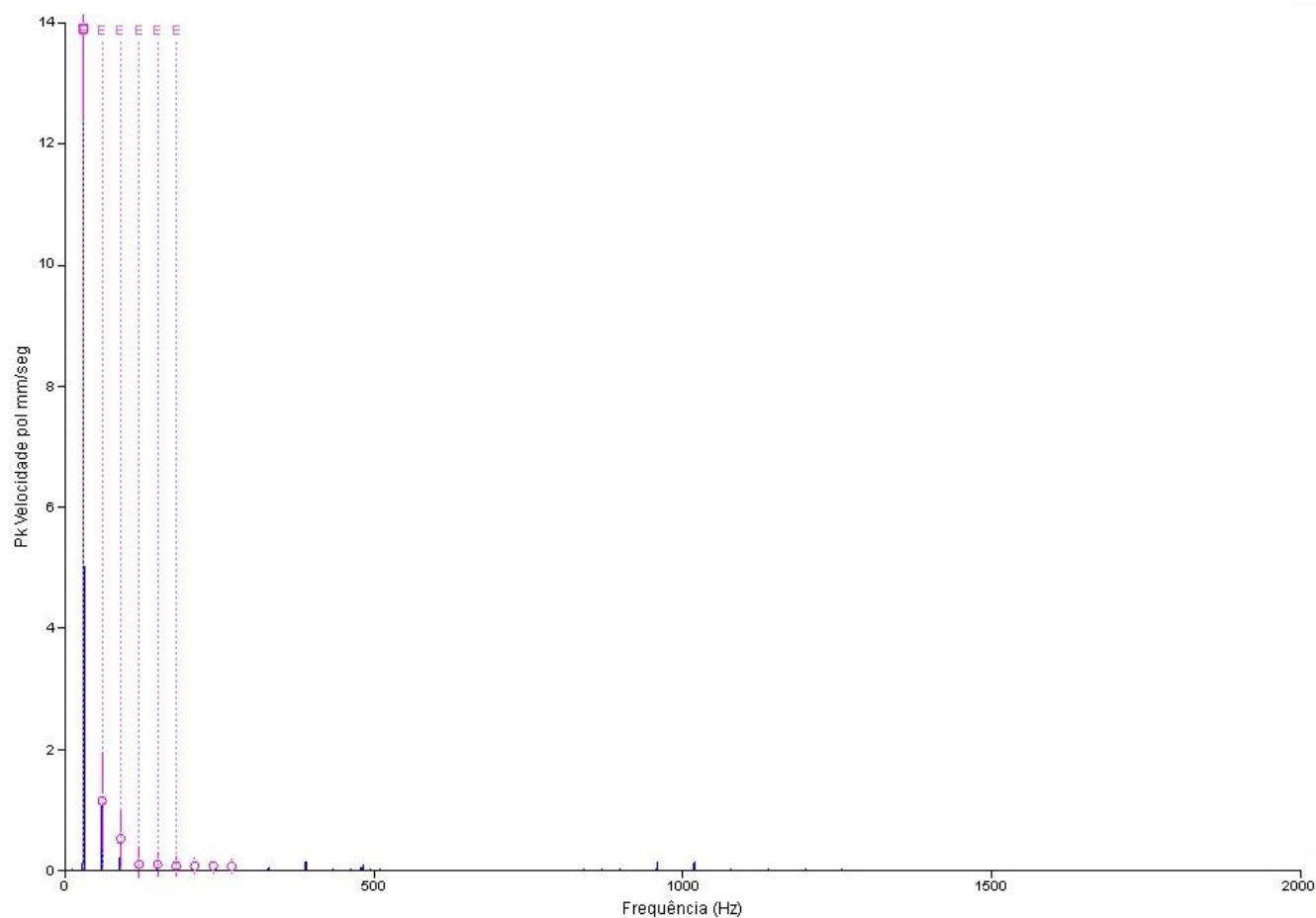
Figura 82 – Gráfico com espectro sentido vertical LA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.



Fonte: Autor.

No sentido axial LA, Figura 83, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 13,83 mm/s.

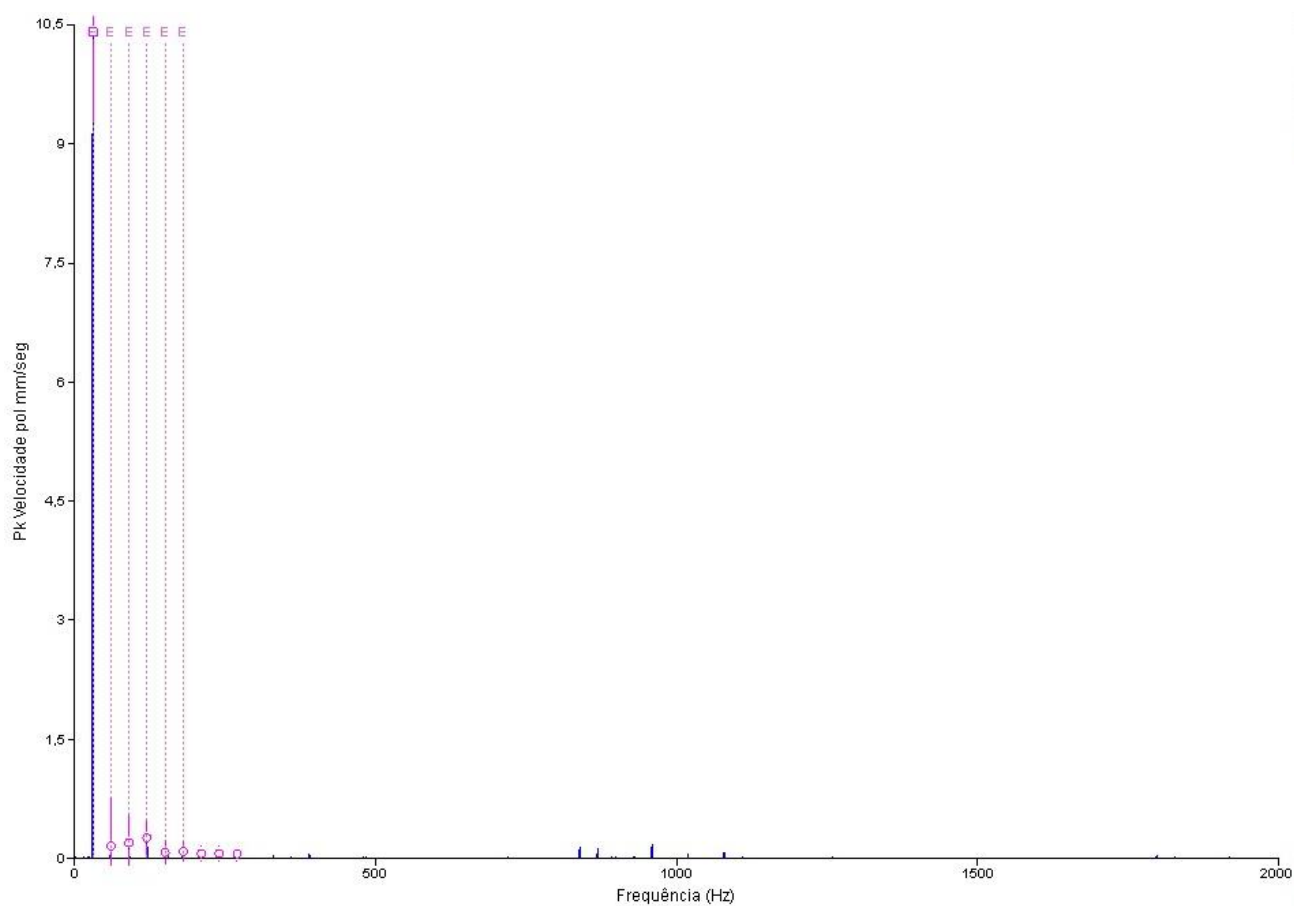
Figura 83 – Gráfico com espectro sentido axial LA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.



Fonte: Autor.

No sentido horizontal LOA, conforme a Figura 84, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 10,35 mm/s.

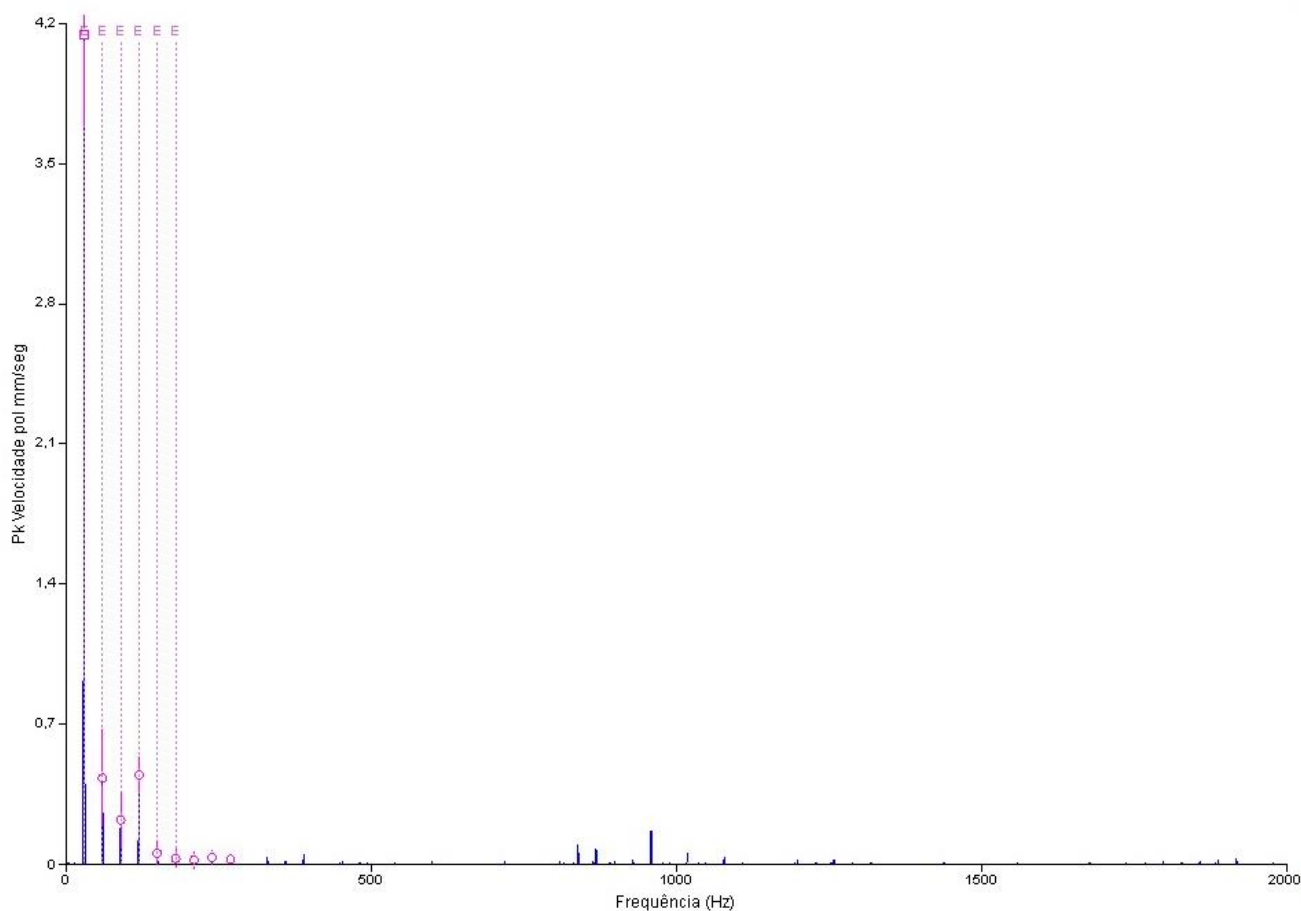
Figura 84 – Gráfico com espectro sentido horizontal LOA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.



Fonte: Autor.

No sentido vertical LOA, conforme a Figura 85, podemos observar que no parâmetro velocidade RMS do motor, a amplitude do pico de referência é de 4,124 mm/s.

Figura 85 – Gráfico com espectro sentido vertical LOA - MIT com carga, barra do estator com abertura e rompimento de uma bobina.



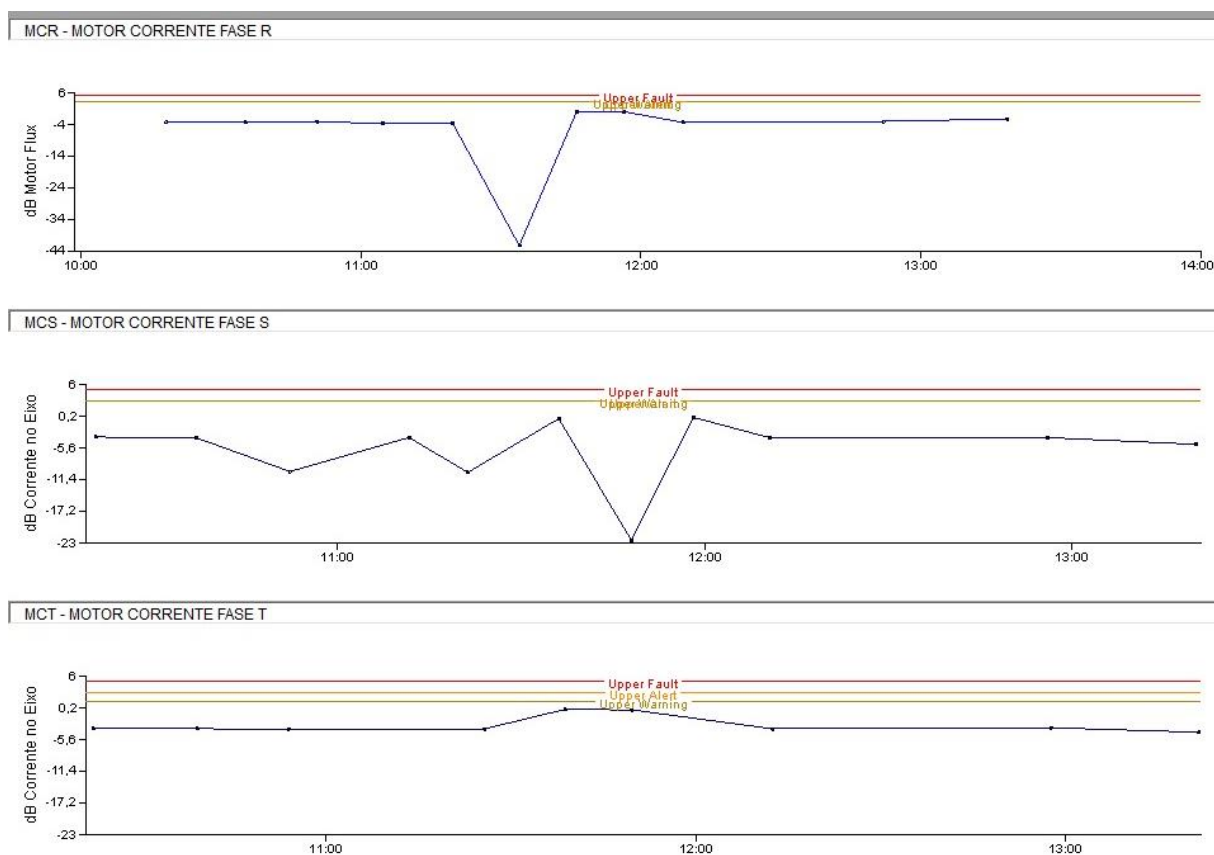
Fonte: Autor.

5.2 ANÁLISE DE ESPECTRO DE CORRENTE

Assim como feito para análise de vibração a análise de espectro de corrente foi realizada em conjunto com os 11 testes para simulação de falha. A princípio é apresentado uma visão geral dos resultados da aplicação dos defeitos no motor através das curvas de tendência, representando as três fases de alimentação do MIT (R, S e T). Na Figura 86 está apresentada a evolução das falhas através da perspectiva da MCSA em relação a severidade do defeito aplicado.

A curva de tendência tem como principal função a observação do aumento da amplitude que está diretamente relacionado com o nível de severidade do defeito aplicado ao motor durante os testes, os alarmes apresentados são baseados em parâmetros pré-determinados no Software que estipula a gravidade baseada na aplicação da máquina.

Figura 86 – Gráfico de tendência com espectro de corrente.

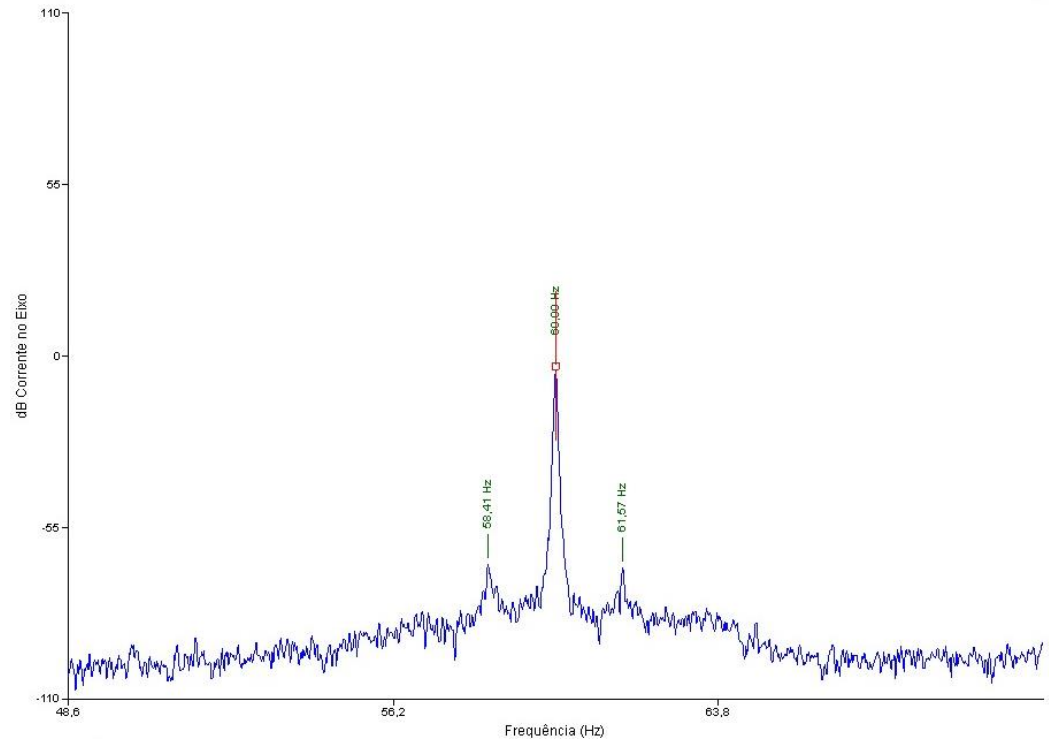


Fonte: Autor.

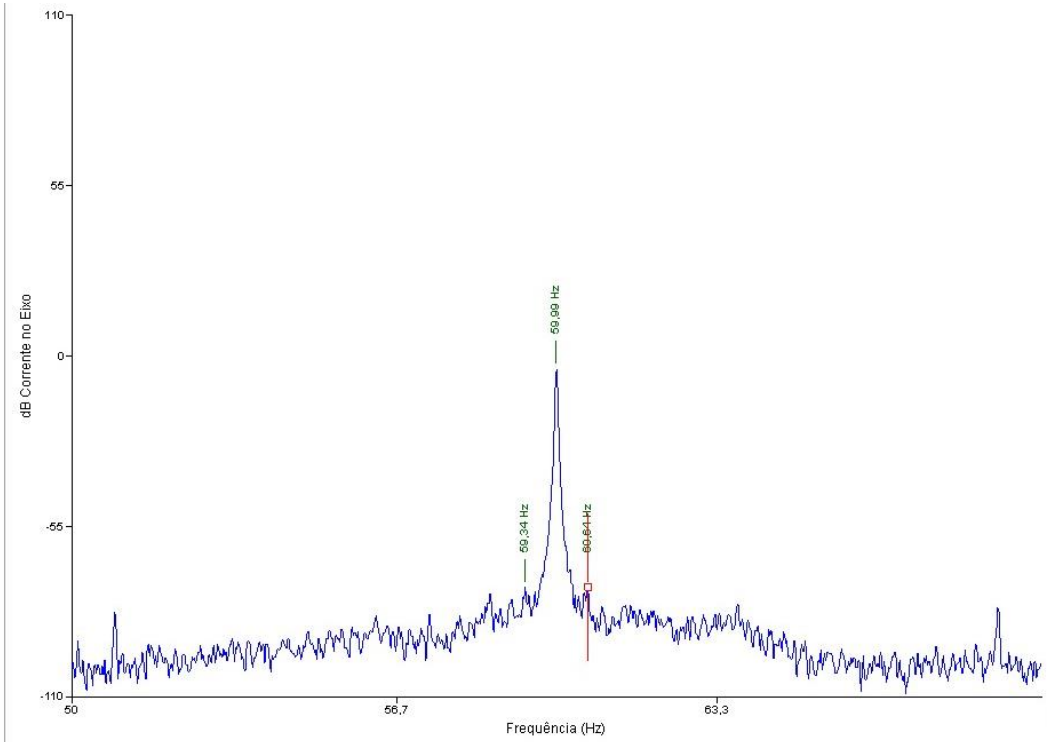
5.2.1 Condições iniciais do MIT

A 1ª leitura do motor antes da aplicação de defeitos e sem a carga no eixo, está representada na Figura 87 (a), (b) e (c). É ilustrada o espectro de corrente com motor operando na frequência de rede igual a 60 Hz, onde pode-se observar que há presença de harmônicos (bandas laterais). Ao aplicar a Equação 3.2 é visto que a diferença entre picos nas fases R, S e T é de 62,61 dB's, 71,35 dB's e 66,73dB's, o que significa que pela Tabela 5, as barras do rotor estão em perfeitas condições. A forma apresentada pelo espectro não corresponde as outras falhas conhecidas. Sendo assim não foi diagnosticado defeito neste momento no motor.

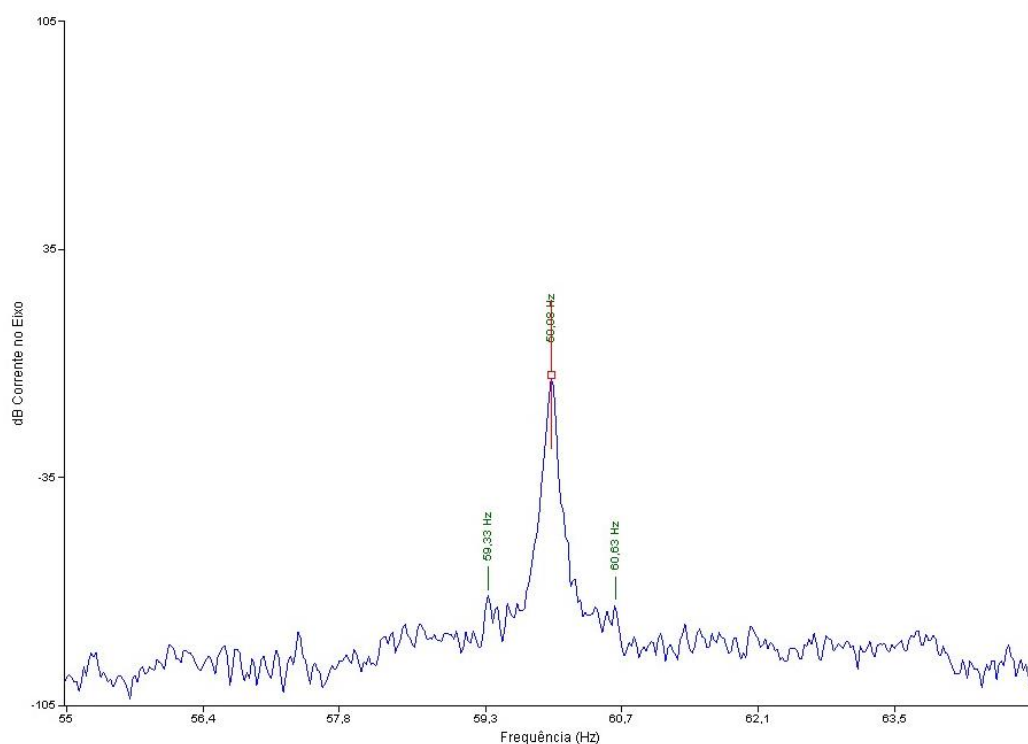
Figura 87 – Gráfico de espectro de correntes fases R (a), S (b) e T (c) – MIT sem carga e sem defeito.



(a)



(b)



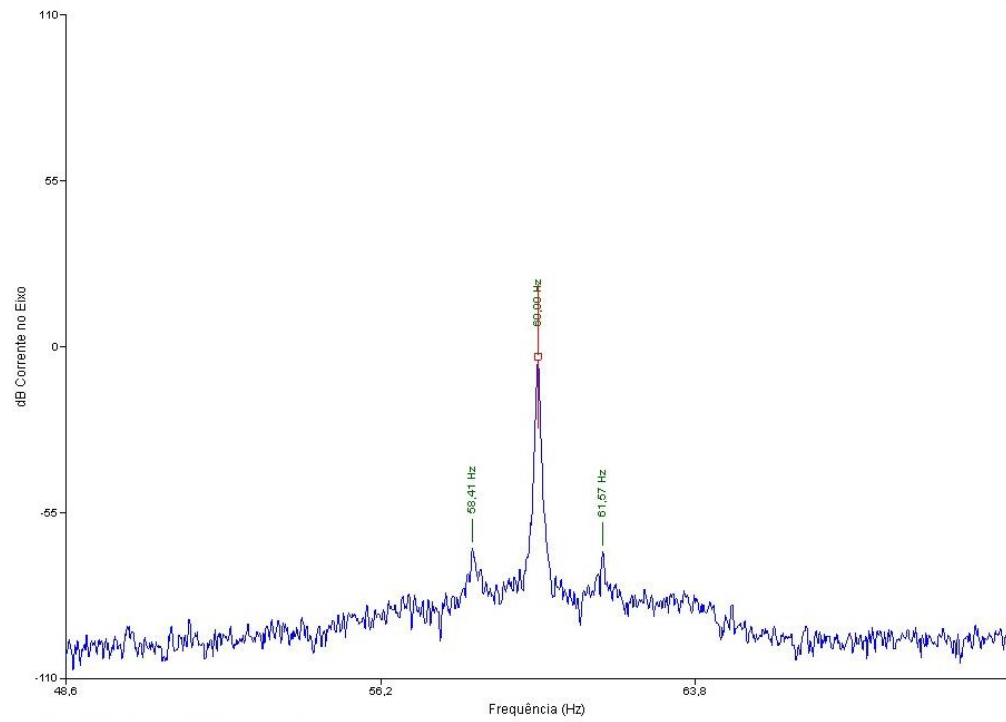
(c)

Fonte: Autor.

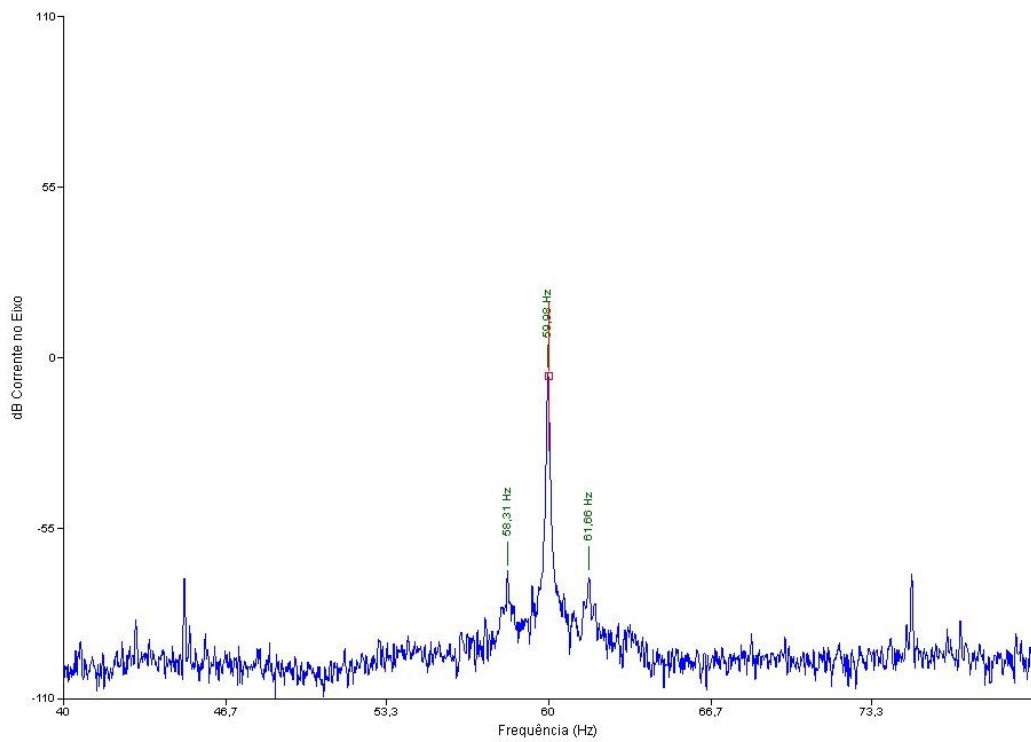
5.2.2 Teste com aplicação de carga acoplada ao eixo

Ao aplicar a Equação 3.2 na Figura 88 (a), (b) e (c), que a diferença entre picos nas fases R, S e T é de 70,61 dB's, 69,31 dB's e 68,18 dB's, o que significa que pela Tabela 5, as barras do rotor estão em perfeitas condições. A forma apresentada pelo espectro não corresponde as outras falhas conhecidas. Sendo assim não foi diagnosticado defeito neste momento no motor.

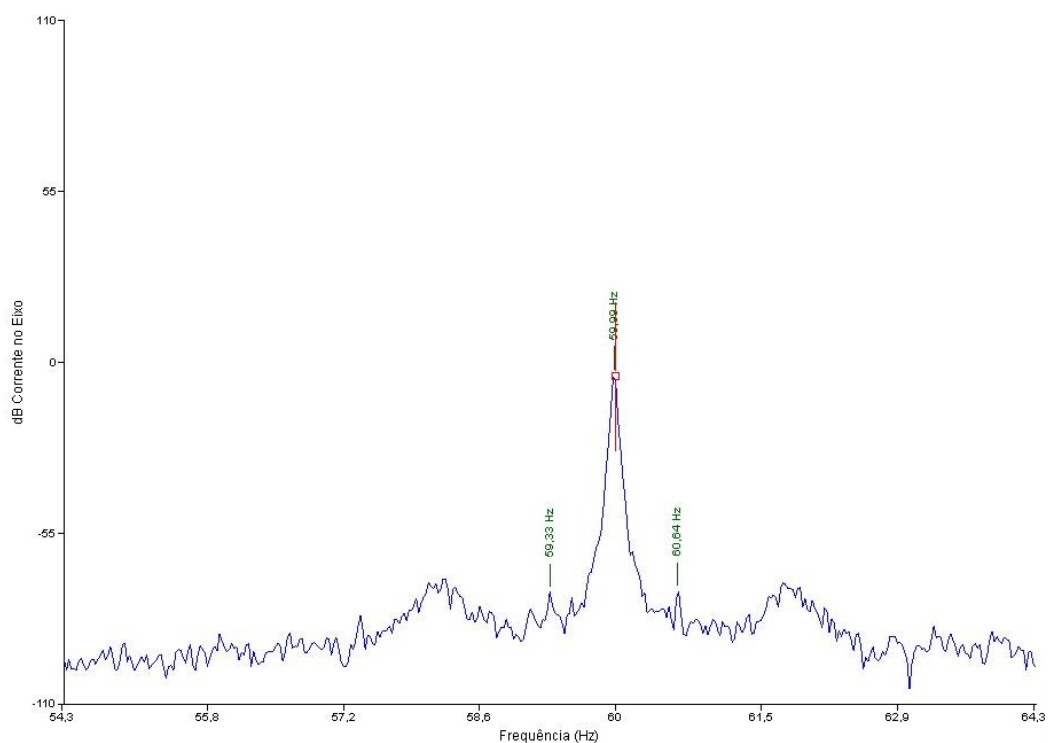
Figura 88 – Gráfico de espectro de corrente fases R (a), S (b) e T (c) – MIT com carga e sem defeito.



(a)



(b)



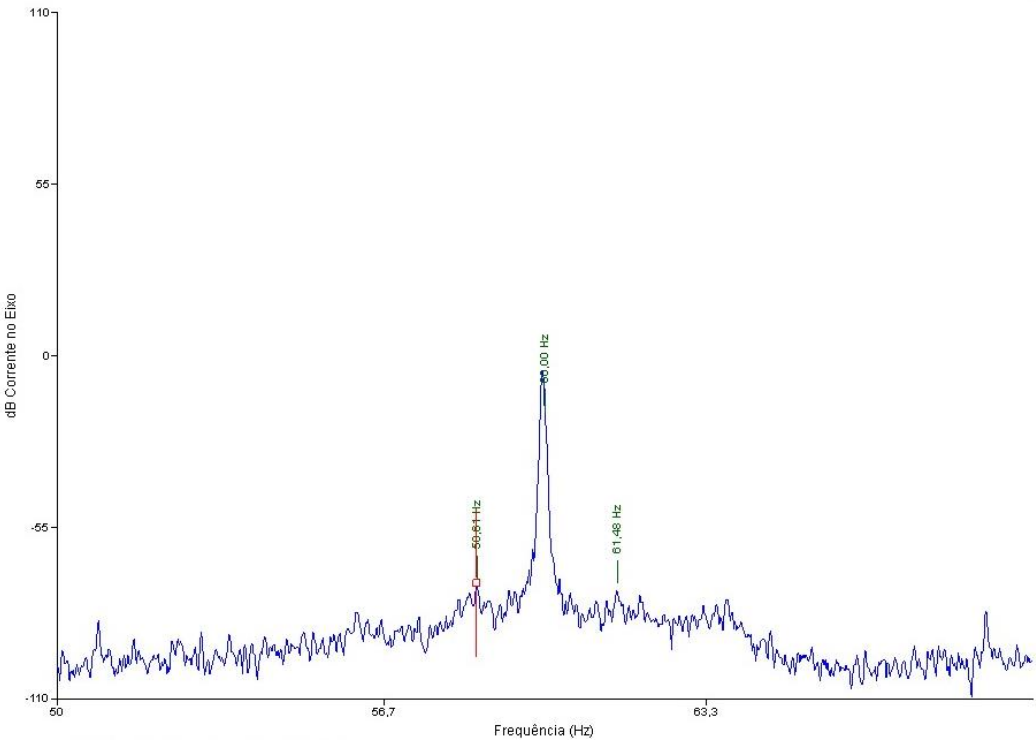
(c)

Fonte: Autor.

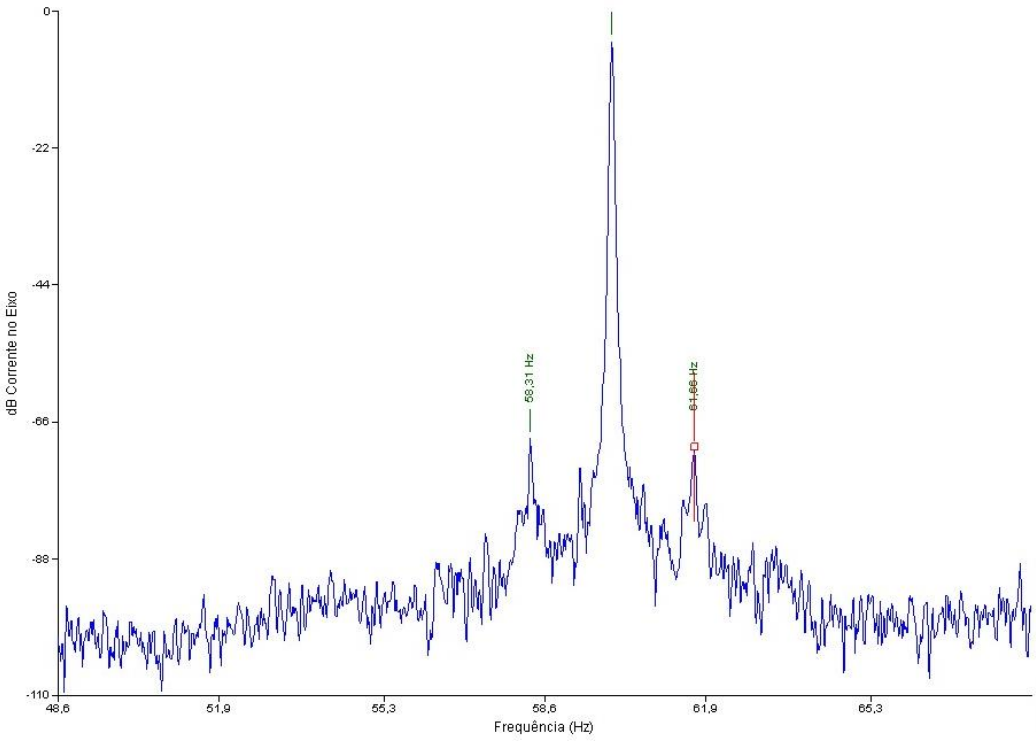
5.2.3 Teste com carga e borne solto

Ao aplicar a Equação 3.2 nos picos ilustrados na Figura 89(a), (b) e (c), é visto que a diferença entre picos nas fases R, S e T é de 69,31 dB's, 63,67 dB's e 64,83 dB's, o que significa que pela Tabela 5, a avaliação para condição de barras quebradas ou trincadas no rotor, possui uma avaliação excelente, ou seja, o motor está operando em condições normais. A forma apresentada pelo espectro não corresponde as outras falhas conhecidas. Sendo assim não foi diagnosticado defeito neste momento no motor.

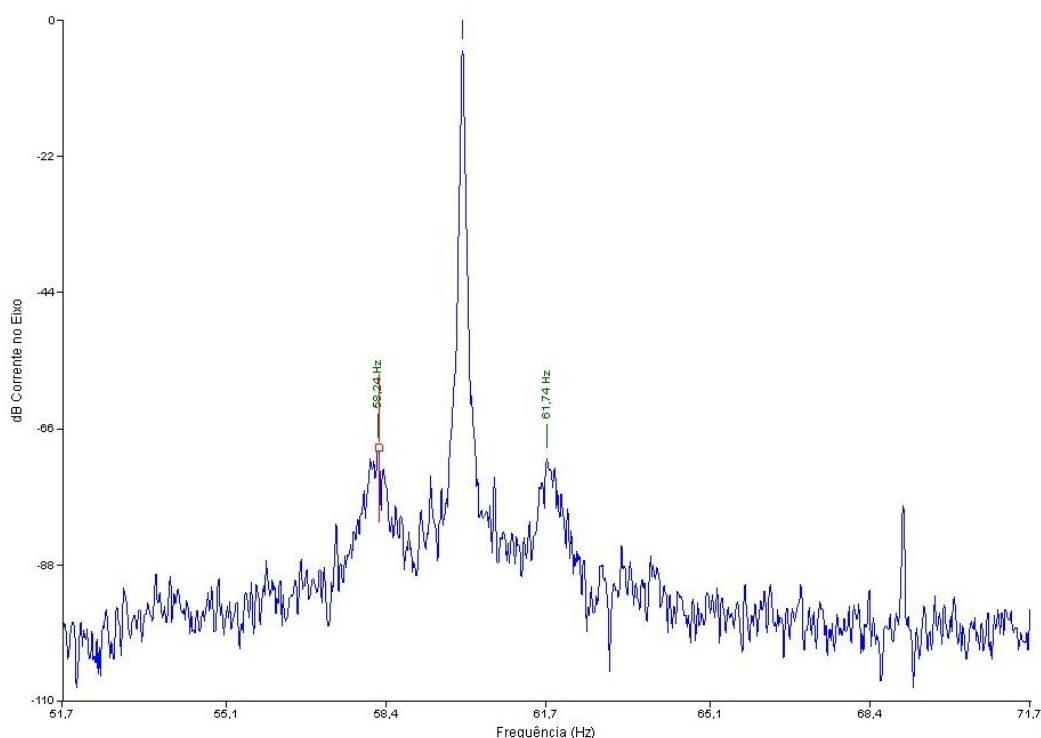
Figura 89 – Gráfico de espectro de correntes fases R (a), S (b) e T (c) – MIT com carga e borne solto.



(a)



(b)



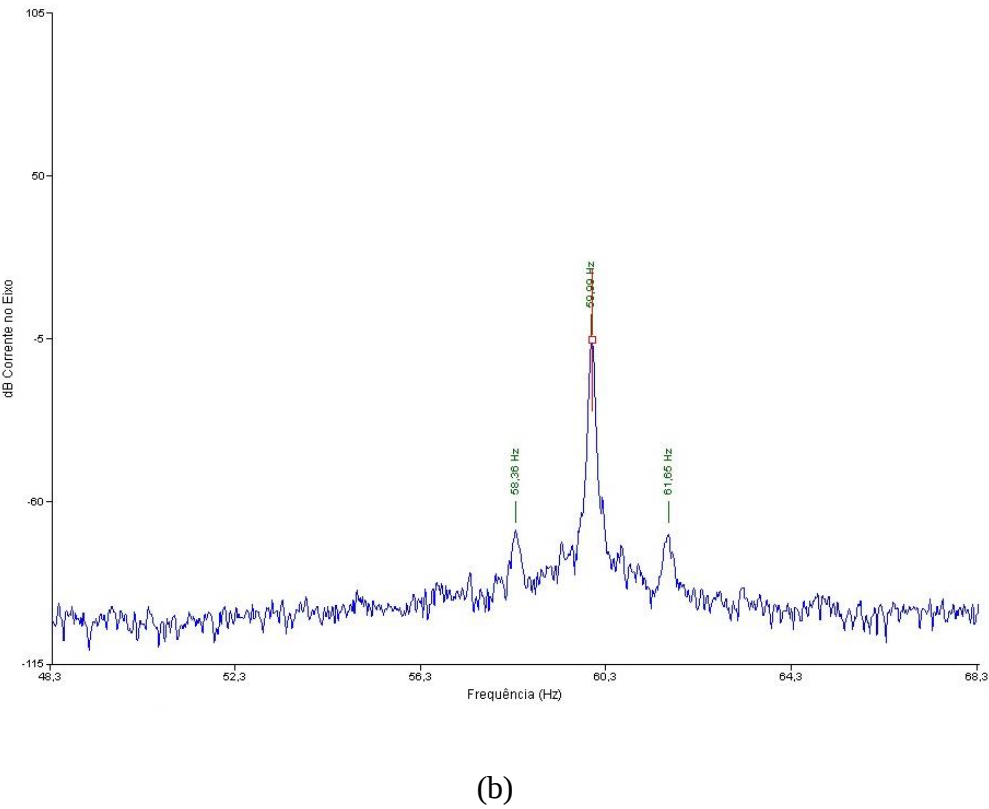
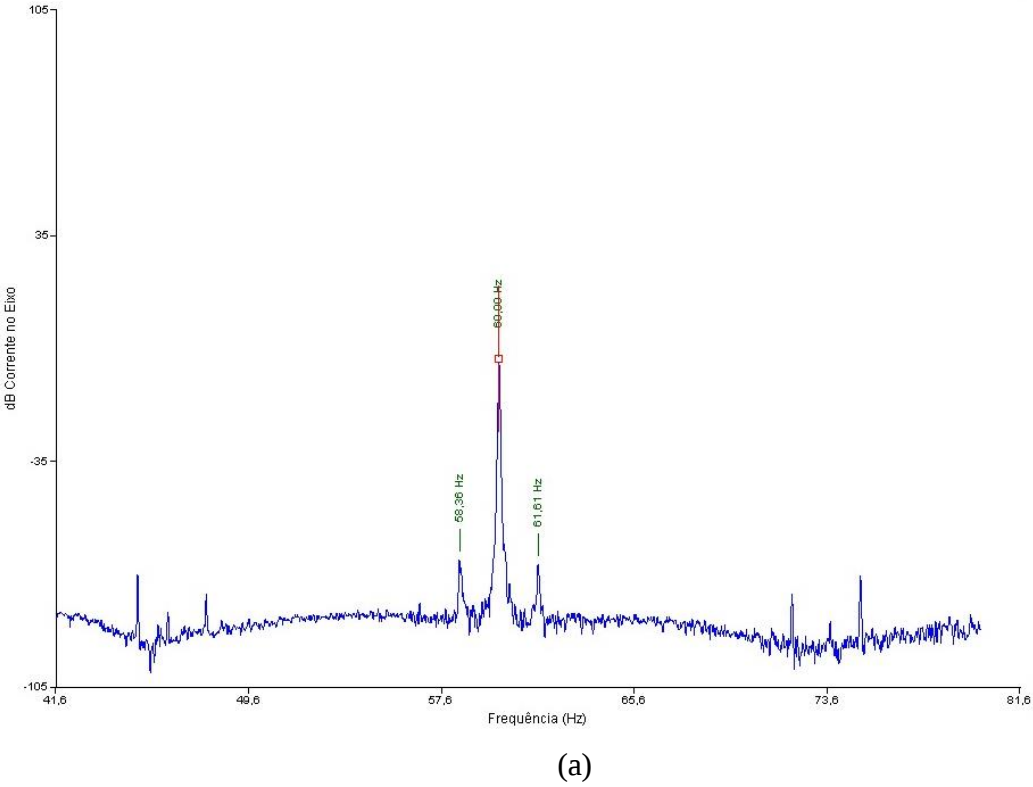
(c)

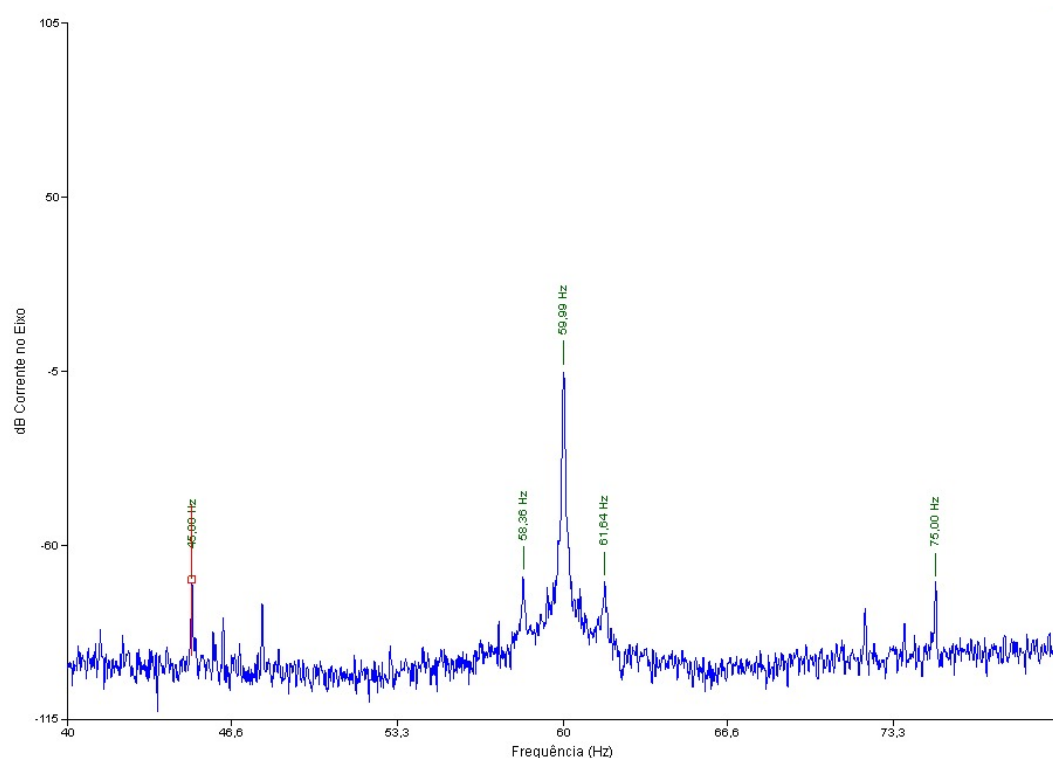
Fonte: Autor.

5.2.4 Torção de carcaça

Ao aplicar a Equação 3.2 na Figura 90 (a), (b) e (c), que é a diferença entre picos nas fases R, S e T é de 61,02 dB's, 62,05 dB's e 64,71dB's, o que significa que pela Tabela 5, as barras do rotor estão em perfeitas condições. A forma apresentada pelo espectro demonstra surgimento de picos espaçados igualmente da frequência fundamental (45Hz e 75Hz) o que significa através da associação de padrões de formas de defeitos estudas que há indícios na imagem da fase R e T, presença de excentricidade estática no entreferro do equipamento.

Figura 90 – Gráfico de espectro de correntes fases R (a), S (b) e T (c) – MIT com carga e torção na carcaça.





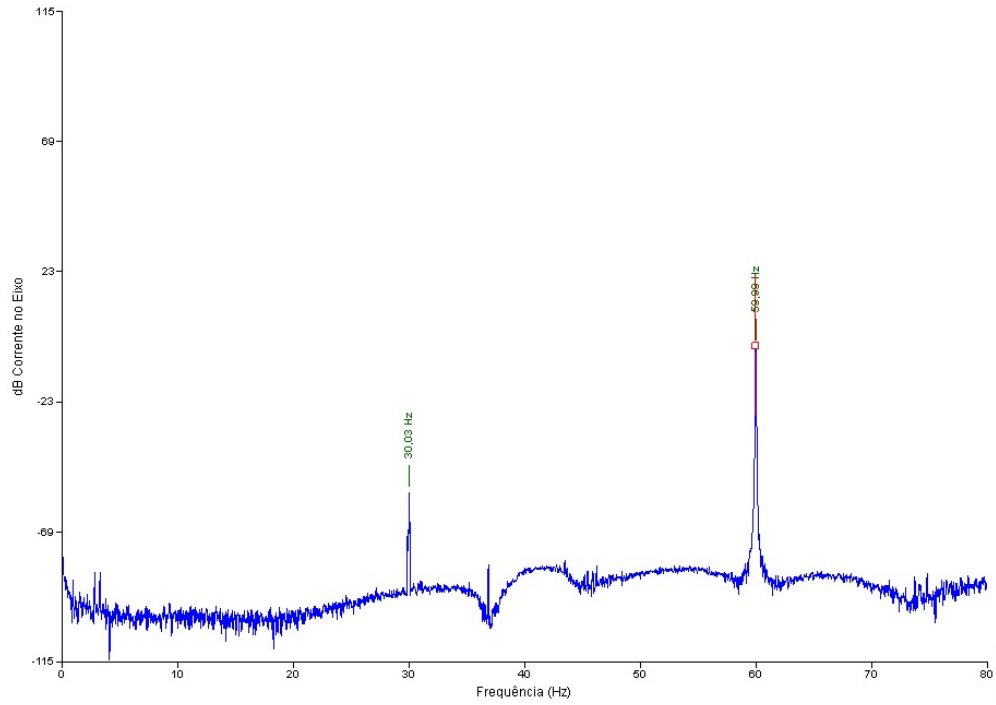
(c)

Fonte: Autor.

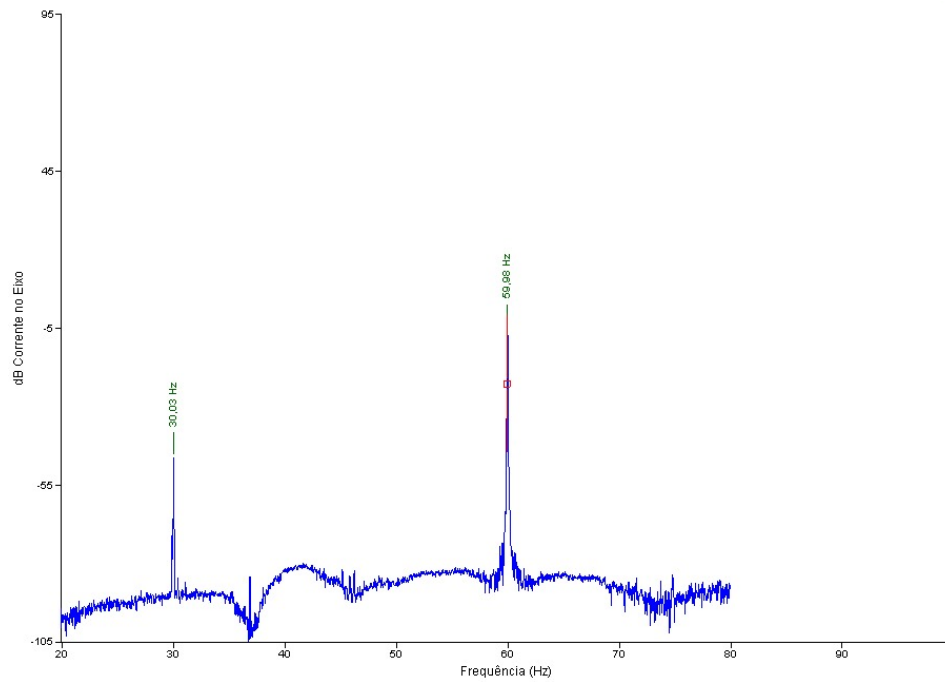
5.2.5 Abertura na barra e rompimento de um filamento da bobina do estator

A forma apresentada pelo espectro da Figura 91 (a), (b) e (c) não corresponde as outras falhas conhecidas. Sendo assim não foi diagnosticado defeito neste momento no motor. A suposição a respeito desta leitura fica baseada no teste em que o motor estava sendo submetido no momento. Mas não há comprovação se o rompimento de um filamento da bobina do estator e o dano provocado na barra do estator esteja relacionado a forma com que o gráfico se apresentou. As amplitudes de pico na frequência fundamentam de 60Hz é: -4,19dB's na fase R, -5,65dB's na fase S e de -6,98 dB's na fase T.

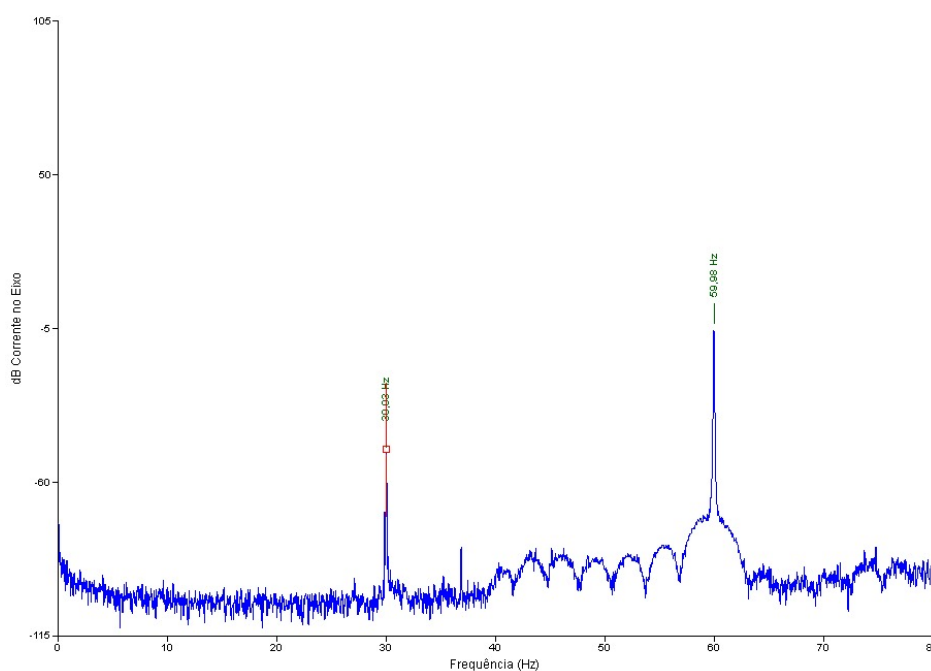
Figura 91 – Gráfico de espectro de correntes fases R (a), S (b) e T (c) – MIT com carga e barra do estator com abertura e rompimento de uma espira.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor.

5.3 DISCUSSÃO DO RESULTADO

O motor utilizado na bancada de teste, se encaixa na primeira classe da Tabela 4 (< 20CV) da norma ISO 10816-3. Dentre as medições realizadas observou-se que as amplitudes obtidas estavam entre níveis aceitáveis e críticos. Na primeira leitura já se detectou um desbalanceamento em todos os sentidos medidos (Horizontal LA, Vertical LA, Axial LA, Horizontal LOA e Vertical LOA), mas a um nível aceitável. À medida que foi simulado defeitos como afrouxamento das conexões de entrada de energia do motor (3ª a 5ª) e desconexão total de uma fase, fazendo com que a máquina operasse com duas fases (6ª a 8ª), fizeram com que o motor de teste alcançasse níveis de vibrações maiores que 4 mm/s que representa início de ponto de atenção pois há diagnóstico de operação não saudável do equipamento. A 4ª leitura apresenta amplitude maior que a 7ª leitura que representa a ausência da fase, isso se deu a influência do ponto medido, nota-se que nos outros sentidos de medição o sinal obtido foi maior que os bornes soltos. Ao inserir defeitos de caráter destrutivo no MIT foi possível observar que o nível de severidade da medição obtida aumentou significativamente, chegando a atingir níveis de vibrações críticos. Na Tabela 18, é representado de forma geral os resultados obtidos durante as coletas e já classificado quando sua severidade, baseando-se na norma ISO 10816-3.

Tabela 18 – Medições simuladas classificadas de acordo com a norma ISO 10816-3 - Valores de velocidade RMS de vibração de todos os pontos de coleta do motor de indução ensaiado.

LEITURAS	DESCRIÇÃO	H LA	V LA	A LA	H LOA	V LOA
1ª LEITURA	Motor sem carga e sem defeito	0,475	2,427	2,009	4,318	1,686
2ª LEITURA	Motor com carga e sem defeito	4,06	0,994	4,017	3,931	0,955
3ª LEITURA	Motor com fase R frouxa	4,081	0,988	4,167	4,189	0,994
4ª LEITURA	Motor com fase S frouxa	7,175	1,348	6,401	5,113	0,951
5ª LEITURA	Motor com fase T frouxa	5,8	1,364	6,874	5,456	1,047
6ª LEITURA	Motor com fase R solta	8,077	2,32	7,003	5,628	0,994
7ª LEITURA	Motor com fase S solta	4,425	2,148	6,831	5,8	1,133
8ª LEITURA	Motor com fase T solta	7,433	1,987	8,206	5,757	1,278
9ª LEITURA	Motor com carcaça torcida	6,917	3,093	10,4	5,929	1,042
10ª LEITURA	Motor com abertura na barra do estator	11,77	8,464	15,64	11,26	5,499
11ª LEITURA	Motor com abertura na barra e espira rompida no estator	10,74	8,454	13,83	10,35	4,124

Fonte: Autor.

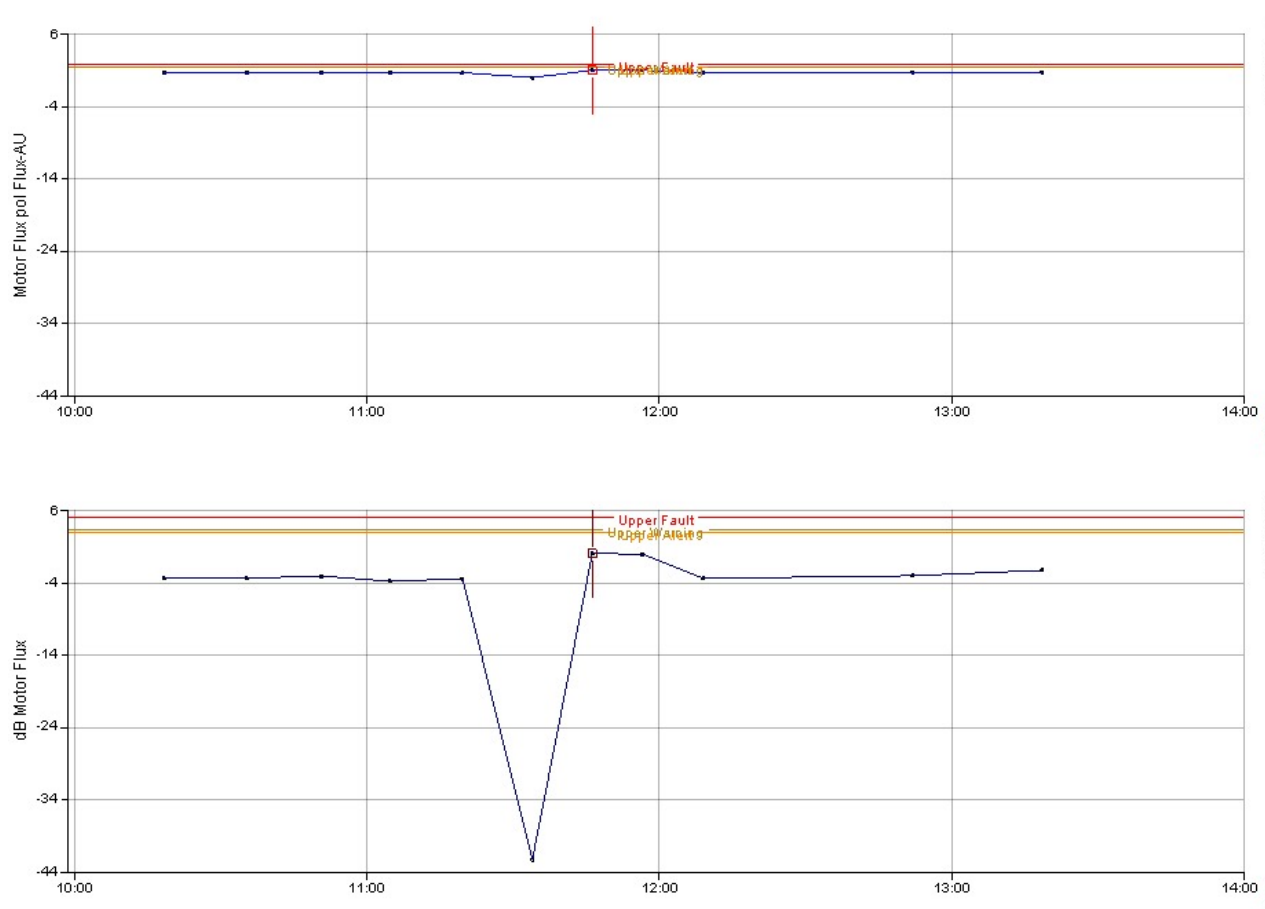
O método de análise de corrente aplicado conforme a literatura, identificou-se o pico na frequência fundamental (60Hz) e assim calculado a diferença deste pico com o a amplitude das bandas laterais para determinação da severidade da amplitude obtida. A identificação da falha se deu pelo cálculo das frequências de defeito definidas através das equações da Tabela 5.

Com a análise, as primeiras leituras não indicaram nenhum defeito presente na máquina. O método de associação de padrões de bandas laterais presentes na forma apresentada pelo espectro ajudou a identificar que na 9ª leitura, com a torção da tampa do motor o espectro de corrente de duas fases identificou excentricidade estática referente ao entreferro. Na 11ª leitura obteve-se um gráfico com formato arredondado que pela literatura estudada não foi possível afirmar se estava sendo representado defeito nas barras do estator, mas por representar curvas não obtidas nos testes anteriores, supõem-se associação com defeitos referentes as simulações de caráter destrutivo no estator, ao qual o motor de indução foi submetido neste último teste.

Nas Figuras 93, 94 e 95 é apresentado os gráficos de tendencia referente as coletas obtidas durante as simulações realizadas no motor. Na figura 92 e 93 é visto que as amplitudes em dB's são próximas, formando assim gráficos semelhantes. A Figura 94 é o gráfico referente a fase T, ao qual durante o processo de obtenção foi perdida duas medições, que correspondiam a 6ª e 8ª leitura. Os gráficos de tendencia obtidos trazem informações das maiores amplitudes

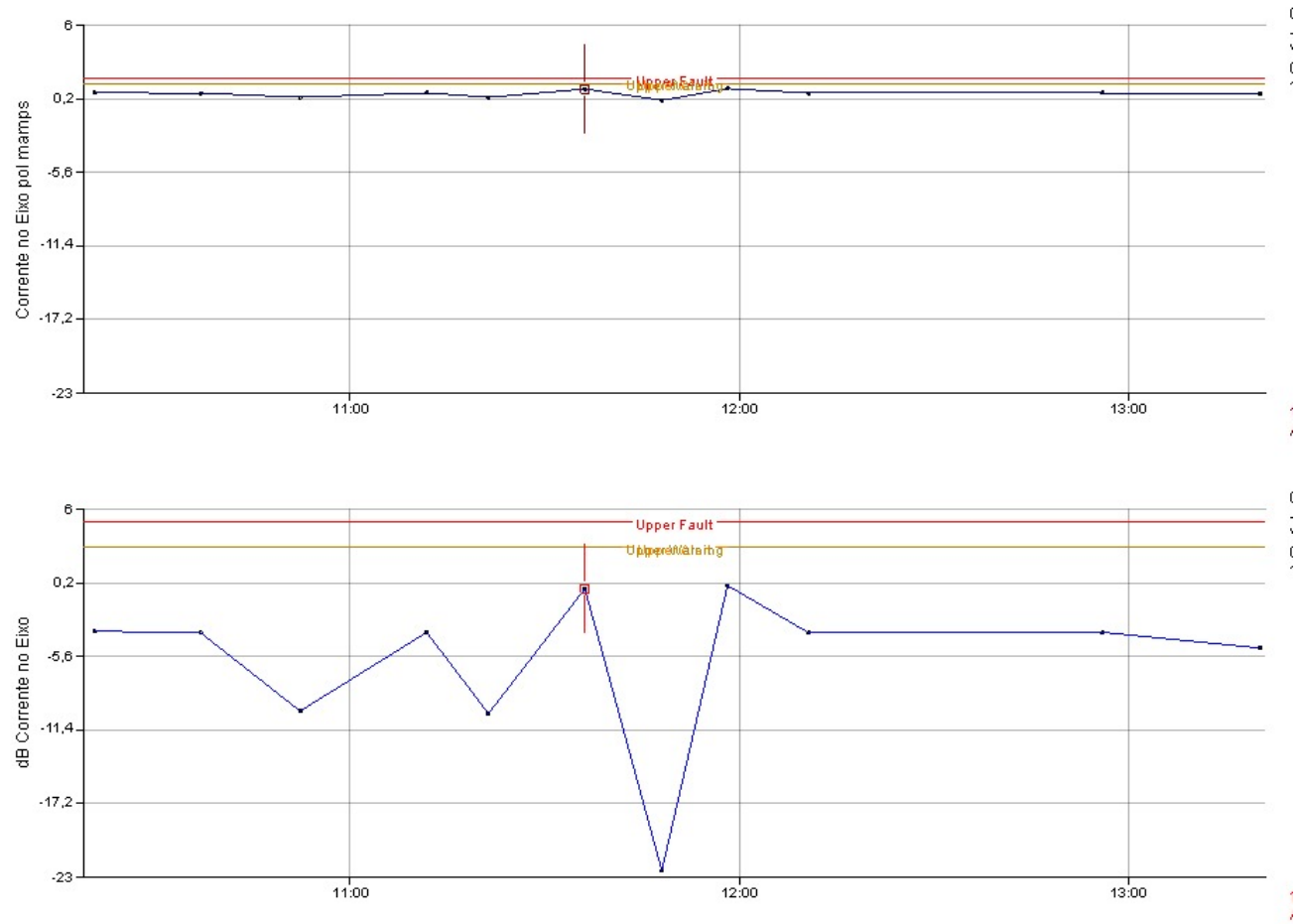
obteve-se em cada teste e também o comportamento da corrente de alimentação do motor para cada fase, durante as simulações realizadas. Nota-se pela corrente medida que ocorreu pouca variação, onde teve-se aumento da corrente foi quando se tirava uma fase do motor e o deixava operando com duas. O que representa o desequilíbrio das fases ao ter o motor de indução trifásico trabalhando com apenas duas de suas fases.

Figura 92 – Gráfico de tendência das medições realizadas na fase R.



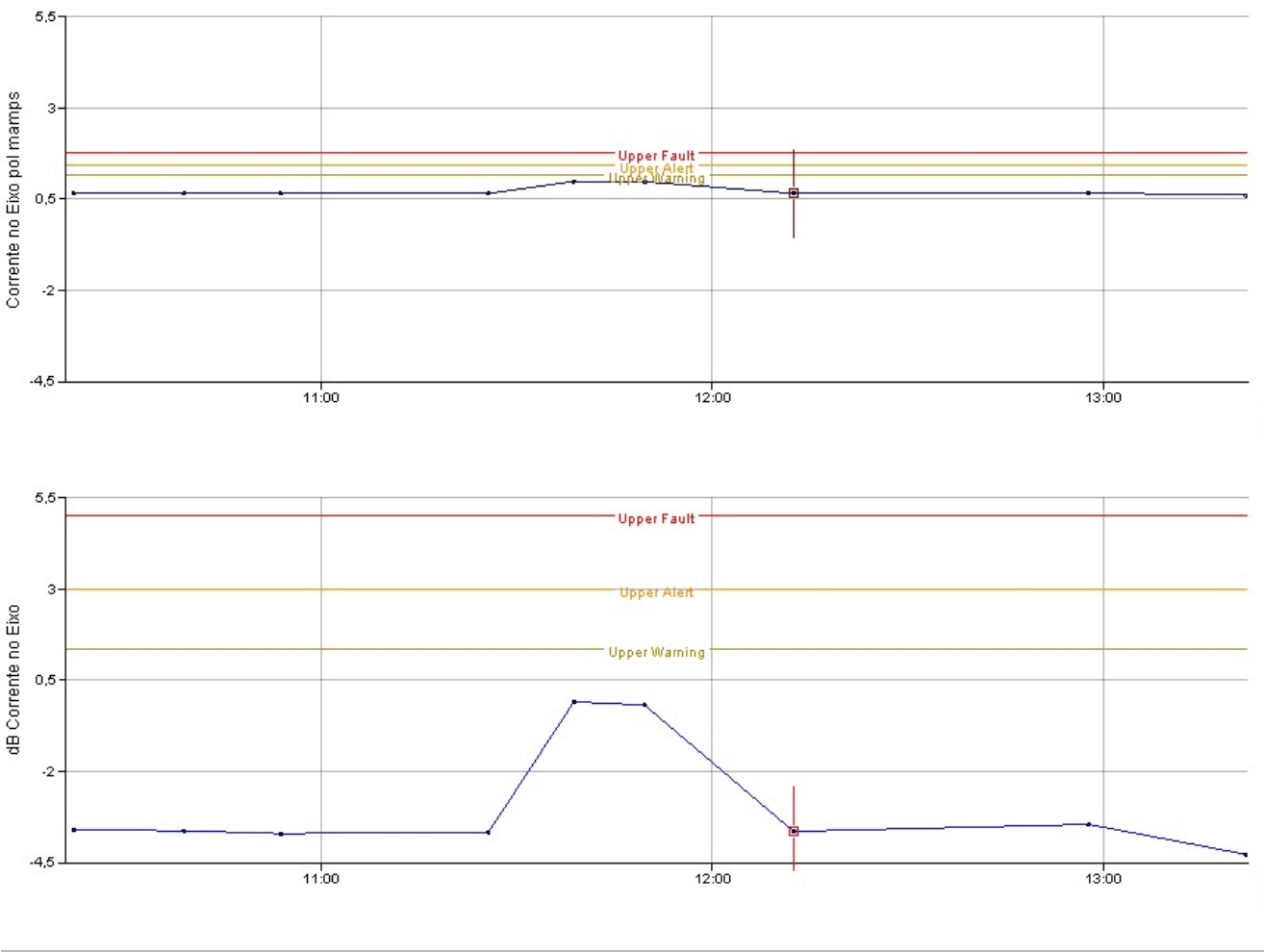
Fonte: Autor.

Figura 93 – Gráfico de tendência das medições realizadas na fase S.



Fonte: Autor.

Figura 94 – Gráfico de tendência das medições realizadas na fase T.



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho propôs e analisou duas técnicas de manutenção preditiva para diagnóstico de falha em motores de indução trifásico. Ao realizar as medições no equipamento de estudo e avaliar o comportamento das correntes de alimentação e as vibrações presentes durante a operação da máquina foi possível observar comportamentos nos níveis de vibração (mm/s) e dB's que evidenciaram anormalidade de funcionamento. Os defeitos simulados não tiveram tanta evidência conforme visto na revisão literária do Capítulo 3. A operação do motor com uma carga baixa, conforme a aplicada em teste, pode ter influenciado na resposta. Sugere-se um estudo com uma simulação de carga variável com maior controle, por exemplo, como aplicação do Freio de Foucault para teste com cargas mais relevantes.

No decorrer das análises dos gráficos gerados pelo Software AMS® Suite: Machinery Health Manager 5.0, notou-se divergências entre o que é apresentado pelas literaturas a respeito das técnicas de manutenção e a realidade com as análises dos testes simulados. Apesar das divergências, foi possível concluir que a partir da inserção e simulação de defeitos a máquina respondia de forma a evidenciar seu mal funcionamento, a ponto de indicar anormalidade e, portanto, tornando-se um item de atenção para futuras manutenções, evitando assim a intervenção em um momento inesperado.

Por fim, apesar das dificuldades em encontrar nas análises obtidas os padrões apresentados como características de falhas específicas no motor, foi possível notar as reações das técnicas quando submetidas simulações de defeitos no MIT.

Para futuros trabalhos propõe-se a aplicação das técnicas apresentadas, em conjunto com outras técnicas de análise preditiva como a termografia, megômetro em motores de indução trifásicos e a utilização de lógica fuzzy (sistemas nebulosos) para detectar e diagnosticar defeitos através da análise e interpretação dos dados coletados. Possibilitando assim o uso dos parâmetros para obtenção de uma resposta para o defeito diagnosticado.

7. REFERÊNCIAS

- [1] NEPOMUCENO, L.X. Técnicas de manutenção preditiva. 1a ed., São Paulo: Blucher, 1989.
- [2] Filho, Guilherme Filippo. Motor de indução. 2a ed., São Paulo: Érica, 2013.
- [3] BONALDI, Erick Leandro. Diagnóstico Preditivo de Avarias em motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de conjuntos Aproximados. Tese de Doutorado, apresentado em Itajubá, UNIFEI, 2006.
- [4] SANTOS, Luís Márcio Alves. Et al. A Importância da manutenção industrial e seus indicadores. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 11, Vol. 01, pp. 108-128. Novembro de 2019.
- [5] OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008.
- [6] <https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/12/02/motores-eficientes-geram-economia-de-energia-na-industria.ghhtml>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- [7] GUIA DE ESPECIFICAÇÃO - MOTORES ELÉTRICOS WEG (JARAGUÁ DO SUL, SC - BRASIL, 2021) <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- [8] MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- [9] FERREIRA, Carlos André. Sistema de monitoramento em motores de indução trifásico utilizando a plataforma ARDUINO. Guarapuava - PR. Univerdade Tecnológica do Paraná, 2019.
- [10] MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019.
- [11] MARQUES, Luiz Felipe Baldo. Manutenção preditiva de motores trifásicos de indução através da análise de assinatura de corrente e fluxo magnético. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Santa Cruz do Sul 2016.
- [12] UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7. AMGH Editora, 2014.

[13] <http://resumosparaengenheiros.blogspot.com/2017/12/dados-da-placa-do-motor-motores.html>. Site consultado/visitado em 30/05/2021.

[14] JUNIOR, PAULO BRONIERA; GOEDTEL, ALESSANDRO; GRACIOLA, CLAYTON LUIZ. Uma estratégia neural para diagnóstico de curto-circuito entre espiras no enrolamento de estator em máquinas de indução trifásicas. Proceedings of XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2013. XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2013), p. 1-6, 2013.

[15] JÚNIOR, Geraldo Motta Azevedo et al. ESTUDO SOBRE A MANUTENÇÃO PREDITIVA EM MOTORES TRIFÁSICOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES. Projectus, v. 1, n. 4, p. 70-83, 2017.

[16] DA SILVA, Cleidson Junior Antonio. Manutenção Preditiva com tecnologia IOT através de sensores de Vibração em motores de indução. Lages, SC. Centro Universitário UNIFACVEST, 2019.

[17] BENEDETTI, Julinho Alberto. Manutenção centrada em confiabilidade e análise de vibração. 2002.

[18] ALMEIDA, M. T. Análise de vibrações na manutenção preditiva de motores elétricos. Technical report, FUPAI 1996.

[19] ABNT. NBR10082: Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15000 rpm. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

[20] Filipe Ascensão; João Pedro Alves Mendonça; Tainah Guimarães Carvalho; Jorge Nei Brito et al. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM UM MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO. In: ANAIS DO CONGRESSO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, 2018, São João Del Rei. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/coen-2018/papers/analise-de-vibracoes-em-um-motor-de-inducao-monofasico>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

[21] HOLANDA, Sandra Maria Santos. Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

[22] WAGECK, Marcelo dos Martyres. Detecção de defeitos em motores de indução pela análise da assinatura da corrente elétrica. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

[23] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. AMGH editora, 2013. SJ Chapman - 2013

[24] KINGSLEY JR, Charles; UMANS, Stephen D.; FITZGERALD, Arthur E. Máquinas Elétricas-: Com Introdução à Eletrônica de Potência. Bookman, 2006.
C Kingsley Jr, SD Umans, AE Fitzgerald - 2006

[25] OLIVEIRA FILHO, Francisco das Chagas de. Sistema de aquisição de dados para monitoramento e predição de falhas em motores elétricos. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia.

[26] ROSSDEUTSCHER JUNIOR, Joe Luiza. Análise de Vibração em Rolamentos Industriais. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário UNIFACVEST.

[27] BANDEIRA, G.; ABREU, G.; GIANELLI, R. Vibração e ruído em manutenção preditiva. UNESP, 2010. Acesso em: 26 jun. 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/39257740/VIBRA%C3%87%C3%83O_E_RUIDO_EM_MANUTEN%C3%87%C3%83O_PREDITIVA.

[28] PINHEIRO, Hélio Henrique Cunha. Sistema para detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução utilizando lógica fuzzy. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[29] CONCEIÇÃO, Maurício Costa da. Metodologia de análise de falha aplicada à confiabilidade operacional de uma moagem de cimento. UFS, 2012. Acesso em: 20 jun. 2021. Disponível em: <https://docplayer.com.br/11142893-Mauricio-costa-da-conceicao.html>

[30] RIBEIRO, Jéssica Mariana. ANÁLISE DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA, ATRAVÉS DO MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, UTILIZANDO CONTROLE POR LÓGICA FUZZY. 2016.

[31] MENEZES, Prisco Araújo. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES APLICADAS À DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE CUBO DE RODA. 2015.

[32] EMERSON, Process Management. Análise de Vibrações Nível I. Apostila do Curso de Análise de Vibrações da CSI means Reliability. 2006.

[33] SILVA, Carlos Filipe Machado. Laboratório para detecção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos. 2017. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciencias e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.

[34] MATHIAS, Mauro Hugo. Ferramentas de diagnóstico de máquinas. Programa de pós-graduação. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, São Paulo, 2012.

[35] LAMIM FILHO, P. C. M., BRITO, J. N. PEDERIVA, R. Acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos através da análise de fluxo magnético. 2003. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

[36] EMATSU, Márcio Yoshikazu et al. Análise espectral da corrente de partida de motores de indução para detecção de falhas nas barras do rotor. 2008. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

[37] WAGECK, Marcelo dos Martyres. Detecção de defeitos em motores de indução pela análise da assinatura da corrente elétrica. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.