

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

GABRIEL BARBIERI LERMEN

**COMPARAÇÃO ENTRE SINAIS DE VIBRAÇÃO E DE ÁUDIO APLICADOS À  
DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2019

GABRIEL BARBIERI LERMEN

**COMPARAÇÃO ENTRE SINAIS DE VIBRAÇÃO E DE ÁUDIO APLICADOS À  
DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Endo

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2019



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



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Gabriel Barbieri Lermen**

### **Comparação entre sinais de vibração e de áudio aplicados à detecção de falhas em motores de indução trifásicos**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 27/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletrônico no programa de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha mãe e à minha vó, que infelizmente faleceu antes de eu concluir o curso, por sempre me apoiarem durante o curso.

Agradeço também ao Prof. Dr. Wagner Endo por aceitar me orientar, e aos professores Cristiano Agulhari e Paulo Scalassara por aceitarem fazer parte da banca.

Ao Herman por ajudar bastante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Cézar, Cristiane e Wellington, que me acompanharam lado a lado durante o curso.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que eu estivesse onde estou hoje.

## RESUMO

LERMEN, Gabriel Barbieri. **Comparação entre sinais de vibração e de áudio aplicados à detecção de falhas em motores de indução trifásicos.** 2019. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Busca-se, neste trabalho, fazer uma comparação entre sinais de áudio e de vibração aplicados à detecção de falhas em motores de indução trifásicos. São apresentados conceitos para se compreender como funciona os equipamentos utilizados, bem como os métodos a serem utilizados para o processamento dos sinais. Os sinais de áudio foram coletados por um microfone e os sinais de vibração, por um acelerômetro. Na realização do trabalho, propõe-se encontrar os espectros de frequência dos sinais e fazer uma comparação visual entre eles, bem como utilizar o mapa auto-organizável, uma arquitetura de redes neurais artificiais, para agrupar os dados, sendo feita uma comparação entre os dois agrupamentos resultantes. Por fim, os resultados e uma discussão sobre eles são apresentados.

**Palavras-chave:** Sinais de áudio. Sinais de vibração. Redes Neurais Artificiais.

## ABSTRACT

LERMEN, Gabriel Barbieri. **Comparison between vibration and audio signals applied to fault detection in three-phase induction motors.** 2019. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

This work seeks to make a comparison between the audio and vibration signals applied to fault detection in three-phase induction motors. Concepts are presented to understand how the used equipment works, as well the methods to be used to the signal processing. The audio signals were collected by a microphone and the vibration signals by an accelerometer. In the work, it is proposed to find the frequency spectrum of the signals and visually compare them, as well to use self-organizing maps, an artificial neural network architecture, to group the data, and make a comparison between the two resulting clusters. Finally, the results and a discussion about them are presented.

**Keywords:** Audio signals. Vibration signals. Artificial Neural Networks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Esquemático do microfone capacitivo.....	14
Figura 2	- Motor de indução trifásico.....	16
Figura 3	- Grade bidimensional.....	20
Figura 4	- Behringer ECM8000.....	21
Figura 5	- Resposta em frequência do microfone.....	22
Figura 6	- Focusrite Scarlet 2i2.....	22
Figura 7	- Acelerômetro SR110A.....	23
Figura 8	- Placa de som USB.....	23
Figura 9	- G-mac MTN 8066.....	24
Figura 10	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em equilíbrio.....	26
Figura 11	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1N do motor saudável em equilíbrio.....	28
Figura 12	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1,5N do motor saudável em equilíbrio.....	28
Figura 13	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em equilíbrio.....	29
Figura 14	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2,5N do motor saudável em equilíbrio.....	30
Figura 15	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3N do motor saudável em equilíbrio.....	31
Figura 16	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3,5N do motor saudável em equilíbrio.....	31
Figura 17	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em equilíbrio.....	32
Figura 18	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4,5N do motor saudável em equilíbrio.....	32
Figura 19	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 1.....	34
Figura 20	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 1.....	35
Figura 21	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 1.....	35
Figura 22	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 2.....	36
Figura 23	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 2.....	37
Figura 24	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 2.....	38
Figura 25	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 3.....	39
Figura 26	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 3.....	40
Figura 27	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 3.....	41
Figura 28	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 4.....	42

Figura 29	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 4.....	43
Figura 30	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 4.....	44
Figura 31	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	45
Figura 32	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	46
Figura 33	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1,5N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	47
Figura 34	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	48
Figura 35	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	49
Figura 36	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3,5N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	49
Figura 37	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	50
Figura 38	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4,5N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio.....	51
Figura 39	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 1.....	52
Figura 40	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 1.....	53
Figura 41	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 1.....	54
Figura 42	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 2.....	55
Figura 43	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 2.....	56
Figura 44	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 2.....	57
Figura 45	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 3.....	58
Figura 46	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 3.....	60
Figura 47	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 3.....	61
Figura 48	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 4.....	62
Figura 49	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 4.....	62
Figura 50	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em equilíbrio.....	64
Figura 51	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1N do motor com problema de rolamento em equilíbrio.....	64
Figura 52	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em equilíbrio.....	66
Figura 53	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3N do motor com problema de rolamento em equilíbrio.....	66

Figura 54	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em equilíbrio.....	67
Figura 55	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 1.....	68
Figura 56	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 1.....	69
Figura 57	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 1.....	70
Figura 58	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 2.....	71
Figura 59	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 2.....	72
Figura 60	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 2.....	74
Figura 61	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 3.....	74
Figura 62	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 3.....	75
Figura 63	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 3.....	75
Figura 64	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 4.....	76
Figura 65	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 4.....	77
Figura 66	- FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 4.....	78
Figura 67	- Agrupamento dos sinais de vibração.....	80
Figura 68	- Agrupamento dos sinais de áudio.....	81

## LISTA DE SIGLAS

BPFI	<i>Ball Pass Frequency Inner Race</i>
BPFO	<i>Ball Pass Frequency Outer Race</i>
BSF	<i>Ball Spin Frequency</i>
FTF	<i>Fundamental Train Frequency</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
SOM	<i>Self-organizing maps</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>12</b>
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Ondas sonoras.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Microfone de eletreto.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise de vibração.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Acelerômetros.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Motores de indução trifásicos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.6</b>	<b>Falhas em motores de indução trifásicos.....</b>	<b>17</b>
2.6.1	Desequilíbrio de fases.....	17
2.6.2	Desequilíbrio de fases.....	17
2.6.3	Desequilíbrio de fases.....	18
<b>2.7</b>	<b>Redes neurais artificiais.....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Bancada de ensaios.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Microfone Behringer ECM8000.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Acelerômetro SR110A.....</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise dos sinais.....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Motor saudável.....</b>	<b>26</b>
4.1.1	Equilíbrio elétrico.....	26
4.1.2	Desequilíbrio elétrico.....	33
<b>4.2</b>	<b>Barras de rotor quebradas.....</b>	<b>44</b>
4.2.1	Equilíbrio elétrico.....	44
4.2.2	Desequilíbrio elétrico.....	51
<b>4.3</b>	<b>Falhas no rolamento.....</b>	<b>63</b>
4.3.1	Equilíbrio elétrico.....	63
4.3.2	Desequilíbrio elétrico.....	67
<b>4.4</b>	<b>Características dos sinais de áudio e vibração.....</b>	<b>79</b>
<b>4.4</b>	<b>Agrupamento no SOM.....</b>	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Motores de indução trifásicos estão presentes em grande parte da indústria tais como refinarias, minas, fábricas e siderurgia, devido à alta confiabilidade e ao baixo custo. Qualquer falha neles causa perdas de produção e pode causar danos permanentes ao motor (GLOWACZ, 2018).

O diagnóstico de falhas em motores tem atraído cada vez mais a atenção de pesquisadores nos últimos anos, principalmente por causa da sua influência na continuidade operacional de processos industriais. A detecção antecipada das falhas leva a uma manutenção mais rápida e eficaz (HENRÍQUEZ et al., 2012). Os métodos que vem sendo pesquisados são análise de vibração, análise elétrica, análise térmica e análise acústica, sendo essas duas últimas chamadas de não invasivas (GLOWACZ, 2018).

Um dos métodos a serem vistos neste trabalho é a análise de vibração. Ela tem por objetivo identificar qual é o problema do motor, já que cada um deles apresenta uma frequência de vibração diferente. Por meio dela, é possível identificar uma série de problemas, como desequilíbrio de fase, barras de rotor quebradas, transientes de tensão, distorção harmônica, desbalanceamento de eixos, desgaste e problemas nos rolamentos, entre vários outros. A análise de vibração é feita utilizando medidores de vibração, que comumente são construídos utilizando acelerômetros do tipo piezoelétrico (TAYLOR, 1994). O outro método a ser visto é a análise acústica. A principal vantagem em relação à análise de vibração é que ela é não invasiva, já que não é necessário fixar nenhum tipo de sensor ao motor, já que a captação do áudio é feita por microfones. (GLOWACZ, 2018).

Nesta pesquisa, busca-se verificar o quão bem as condições do motor são diagnosticadas por meio de sinais de áudio e sinais de vibração utilizando o mapa auto-organizável. Ao final da pesquisa, pretende-se apresentar um comparativo entre as características dos sinais de áudio e de vibração para verificar se a utilização do sinal de áudio para detecção e caracterização de falhas em motores seria uma alternativa viável à análise de vibração.

O trabalho será organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 tem-se a fundamentação teórica, onde são apresentados conceitos importantes referentes à pesquisa. Os materiais e métodos a serem utilizados são mostrados no Capítulo 3. O

Capítulo 4 traz os resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 mostra as conclusões tiradas após a realização do trabalho.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

Fazer uma comparação entre os sinais de áudio e de vibração aplicados à detecção de falhas em motores utilizando redes neurais.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar e comparar de sinais de áudio e vibração;
- Estudar e implementar o mapa auto-organizável;
- Extrair características dos sinais;
- Criar espectros de frequência dos sinais.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Ondas sonoras**

Ondas sonoras são ondas mecânicas que podem se propagar fluidos e sólidos. Os seres humanos podem ouvir ondas sonoras na faixa de frequências de 20Hz a 20kHz (NUSSENZVEIG, 1996).

### **2.2 Microfone de eletreto**

Os microfones são dispositivos que transformam as ondas sonoras em sinais elétricos. Há os mais variados tipos de microfones que utilizam diferentes princípios de funcionamento, sendo o mais comum o capacitivo de eletreto (OLIVEIRA, 2010).

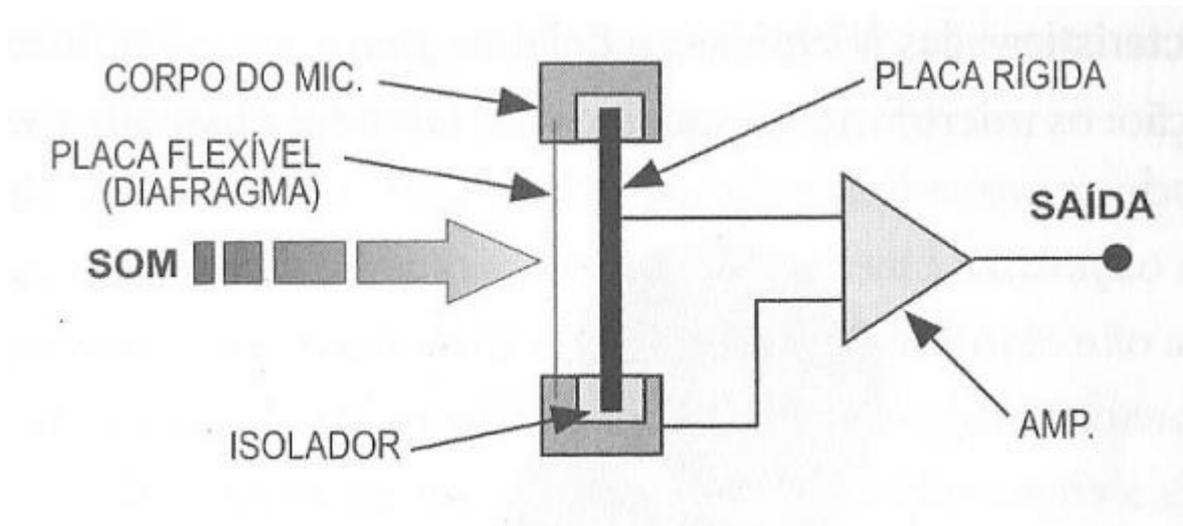
Os microfones desse tipo são formados por uma placa fixa e um diafragma que vibra, além do eletreto, que possui carga quase permanente e faz com que o microfone não precise de polarização, apesar de precisar de alimentação externa para o transistor amplificador (VALLE, 2002).

A vibração causada no diafragma pelas ondas sonoras faz com que a capacitância entre o diafragma e a placa fixa varie, fazendo com que a tensão na saída varie também (OLIVEIRA, 2010).

Há três possibilidades de o eletreto estar presente no microfone. A primeira delas, e a de menor qualidade, é construir o diafragma com eletreto. A outra possibilidade é fixar o eletreto à placa fixa do microfone. A última possibilidade é eliminar a placa fixa e colocar o filme de eletreto no lugar dela, desta forma, o capacitor será formado pelo diafragma e pelo eletreto (OLIVEIRA, 2010).

A Figura 1 mostra um esquemático simples de um microfone capacitivo.

**Figura 1 – Esquemático do microfone capacitivo**



Fonte: Microfones (VALLE, 2002)

### 2.3 Análise de vibração

De acordo com Taylor (1994), o movimento físico de uma máquina é denominado vibração. A vibração pode ser harmônica, periódica ou aleatória.

A análise de vibração é uma forma de verificar o funcionamento de partes móveis de um equipamento. Ela é crucial, principalmente na indústria, na busca de falhas em equipamentos antes que tal equipamento cesse completamente seu funcionamento e comprometa a realização das atividades (RIBEIRO, 2017).

Cada máquina possui uma frequência de vibração característica quando opera em bom estado. Quando há alguma falha, a frequência de vibração torna-se diferente da frequência característica (MMTEC, 2017). Segundo Taylor (1994), a frequência de vibração indica o problema e a magnitude indica a gravidade de tal problema.

A análise de vibração pode ser feita de maneira preditiva, ou seja, ao ser feita constantemente, é possível identificar o problema quando ele ainda está no começo. Desta forma, quando detectado, é possível realizar uma manutenção do equipamento antes que ele prejudique outras partes, assim, haverá uma redução em gastos com manutenções emergenciais e corretivas, bem como estoque de peças para os motores (MMTEC, 2017).

Há uma série de problemas que podem ser detectados por essa análise, tais como desequilíbrio de fase, barras de rotor quebradas, transientes de tensão,

distorção harmônica, desbalanceamento de eixos, desgaste e problemas nos rolamentos, entre vários outros. Ela é feita utilizando medidores de vibração, que normalmente são construídos utilizando acelerômetros do tipo piezoelétrico (TAYLOR, 1994).

## 2.4 Acelerômetros

Os acelerômetros, como o nome sugere, são dispositivos utilizados para medir a aceleração de um corpo. Como a aceleração é calculada como a derivada da velocidade e esta, por sua vez, é derivada da posição, ela pode ser utilizada para fornecer informações sobre a velocidade e a posição.

Há diversos tipos de acelerômetros que utilizam diferentes grandezas físicas para medir a aceleração. Entre os mais comuns estão o piezoelétrico, o piezoresistivo e o capacitivo (ROCHA, MARRANGHELLO, 2013). Os acelerômetros piezoelétricos utilizam a piezoeletricidade como princípio de funcionamento. A piezoeletricidade é uma propriedade de alguns cristais em que uma deformação nele gera tensão. Essa deformação no cristal gera uma tensão proporcional à força aplicada e, conseqüentemente, à aceleração (LIMA, 2013). Os acelerômetros piezoresistivos, diferente dos piezoelétricos que produzem uma tensão para uma deformação mecânica, produzem uma variação na resistência. Os acelerômetros capacitivos produzem uma variação na capacitância para efetuar suas medidas (CALACHE, 2013).

## 2.5 Motores de indução trifásicos

Os motores são equipamentos que transformam energia elétrica em energia mecânica. Entre os tipos mais comuns na indústria está o motor de indução trifásico. Ele é alimentado por três tensões, cada uma defasada 120° em relação à outra. As equações (1) a (3) representam as tensões de cada fase (FILHO, 2007).

$$V_1 = V_m \text{sen}(wt) \quad (1)$$

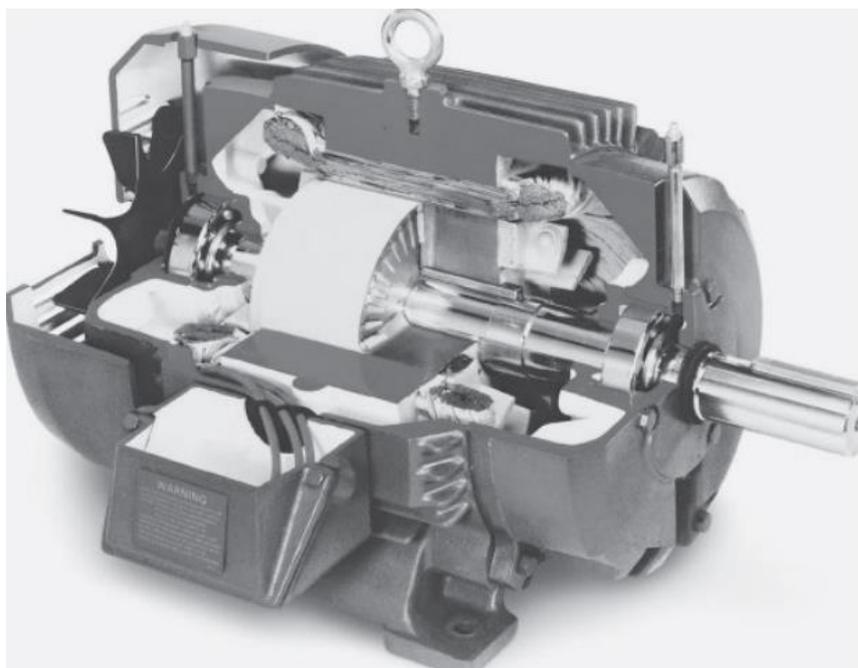
$$V_2 = V_m \text{sen}(wt - 120^\circ) \quad (2)$$

$$V_3 = V_m \text{sen}(wt + 120^\circ) \quad (3)$$

As variáveis  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  são os valores instantâneos das fases 1, 2 e 3, respectivamente,  $V_m$  é o valor de pico da tensão,  $\omega$  é a frequência angular da tensão e  $t$  é o instante de tempo.

De acordo com Filho (2007), os motores trifásicos são formados por dois elementos básicos: o rotor e o estator. O rotor é formado pelo eixo, que é responsável por transmitir a potência mecânica gerada pelo motor, pelo núcleo de chapas, que são fixadas sobre o eixo, e por barras e anéis de curto-circuito, no caso de motores de gaiola, ou enrolamentos, no caso de motores com rotor bobinado. Já o estator é formado por uma carcaça, que é robusta, resistente à corrosão e tem como objetivo suportar todas as partes físicas e móveis do motor, por um núcleo de chapas, que são fixadas ao estator, e enrolamentos. Outros componentes que formam os motores trifásicos são o ventilador, responsável por tirar o calor da carcaça; a tampa defletora, que é um componente com aberturas e fica na parte traseira do motor sobre o ventilador; terminais, que são os condutores que recebem a alimentação do motor; rolamentos, que é o componente mecânico sobre o qual o eixo é fixado; tampa e caixa de ligação, que é onde ficam os terminais do motor. A Figura 2 mostra um típico motor trifásico.

**Figura 2 – Motor de indução trifásico**



Fonte: Máquinas Elétricas (UMANS, 2014)

De acordo com Umans (2014), quando alimentado, a velocidade de rotação do rotor é:

$$N_s = \frac{f}{p} 120 \quad (4)$$

Na equação,  $N_s$  é a velocidade de rotação do motor em rotações por minuto,  $f$  é a frequência das tensões de alimentação e  $p$  é a quantidade de polos do motor.

## 2.6 Falhas em motores de indução trifásicos

As falhas em motores são um grande problema na indústria. As consequências de uma falha negligenciada podem ser a perda de um equipamento todo ou um custo de manutenção emergencial muito caro, bem como, por exemplo, uma linha de produção parada até que a manutenção ou troca do equipamento seja efetuada. Isso tudo significa prejuízos para a empresa, o que é algo completamente indesejável.

A seguir, são conceituados os problemas tratados no trabalho.

### 2.6.1 Desequilíbrio de fases

Apesar de não ser especificamente uma falha do motor, o desequilíbrio de fases afeta diretamente seu funcionamento. Ele ocorre quando as tensões de pico que alimentam o motor são diferentes. Isso faz com as correntes também estejam em desequilíbrio, fazendo com que a temperatura de operação do equipamento aumente, diminuindo sua eficiência e gerando vibrações (CAMPBELL, ARCE, 2016).

### 2.6.2 Barras de rotor quebradas

Segundo Taylor (1994), quando uma barra de rotor está quebrada, é criado um ponto morto no rotor. Esse ponto morto causa um desequilíbrio elétrico que pode fazer com que haja vibrações significativas com uma a duas vezes a velocidade em rotações por minuto.

### 2.6.3 Falhas no rolamento

De acordo com Taylor (1994), um motor com falhas no rolamento pode gerar, no mínimo, cinco frequências. Essas frequências são: frequência de rotação (S), frequência na pista interna da esfera (*BFPI – Ball Pass Frequency Inner Race*), determinada pela Equação (5), frequência na pista externa da esfera (*BFPO – Ball Pass Frequency Outer Race*), determinada pela Equação (6), frequência da gaiola (*FTF – Fundamental Train Frequency*), determinada pela Equação (7), e frequência de elemento rolante (*BSF – Ball Spin Frequency*), determinada pela Equação (8).

$$BFPI = S\left(\frac{N_b}{2}\right)\left(1 + \frac{B_d \cdot \cos \Phi}{P_d}\right) \quad (5)$$

$$BFPO = S\left(\frac{N_b}{2}\right)\left(1 - \frac{B_d \cdot \cos \Phi}{P_d}\right) \quad (6)$$

$$FTF = S\left(\frac{1}{2}\right)\left(1 + \frac{B_d \cdot \cos \Phi}{P_d}\right) \quad (7)$$

$$BSF = S\left(\frac{P_d}{2B_d}\right)\left(1 - \frac{B_d^2 \cdot \cos^2 \Phi}{P_d^2}\right) \quad (8)$$

Nas equações  $B_d$  é o diâmetro da esfera em mm,  $P_d$  é o diâmetro do rolamento em mm;  $N_b$  é o número de esferas do rolamento e  $\Phi$  é o ângulo de contato do rolamento.

## 2.7 Redes neurais artificiais

As Redes Neurais Artificiais, RNA, como o nome sugere, são ferramentas baseadas nas redes neurais biológicas. Haykin (2001, p. 28) define uma RNA como um processador maciçamente e paralelamente distribuído, constituído de unidades de processamento simples, que têm propensão natural a armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Ou seja, uma RNA é capaz de aprender e armazenar conhecimento por meio da experiência, assim como o cérebro humano.

Elas oferecem várias propriedades úteis, como não-linearidade, mapeamento de entrada-saída, adaptabilidade, resposta a evidências, informação contextual, tolerância a falhas, implementação em larga escala e uniformidade de análise e projeto.

As RNA são formadas por neurônios artificiais conectados que geram uma ou mais saídas a partir de uma ou mais entradas. Os neurônios são unidades de processamento de informações fundamentais para a operação de uma RNA. O neurônio artificial é formado por três elementos básicos: conjunto de sinapses, somador e função de ativação (HAYKIN, 2001).

O conjunto de sinapses determinam o peso dos sinais de entrada. O somador soma os sinais de entrada ponderados por suas respectivas sinapses. A função de ativação serve para restringir a magnitude da saída do neurônio. Há também a polarização, que serve para aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, dependendo se é positivo ou negativo, respectivamente. Existem três tipos básicos de função de ativação: função de limiar, função linear por partes e função sigmoide para parâmetro de inclinação variável (HAYKIN, 2001).

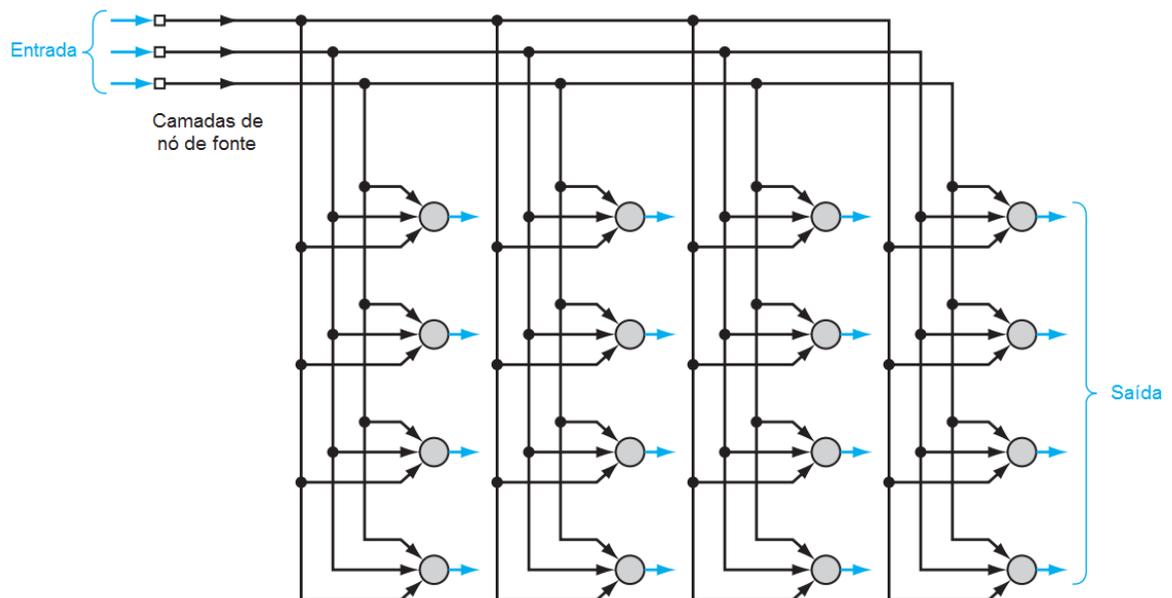
Há diversas arquiteturas para a implementação de uma RNA. Neste trabalho, será utilizada a arquitetura de mapas auto-organizáveis de Kohonen, também chamados de *self-organizing map* (SOM). Essa arquitetura foi escolhida porque, de acordo com Silva, Spatti e Flauzino (2010), sua estrutura simples e dinâmica de treinamento diferenciada faz do SOM uma ferramenta sofisticada para problemas onde há a necessidade da classificação de padrões e agrupamentos de dados com características próprias.

O objetivo principal do SOM é transformar um padrão de sinal incidente de dimensão arbitrária em um mapa discreto uni ou bidimensional. Todos os neurônios da grade bidimensional mostrada na Figura 3 estão conectados à camada de entrada. Cada padrão de entrada apresentado à grade consiste em um foco de atividade, sendo que a localização e natureza do foco variam de uma realização do padrão de entrada para outra. Sendo assim, todos os neurônios da grade devem ser expostos a um número suficiente de diferentes realizações do padrão de entrada para que o processo de auto-organização ocorra apropriadamente (HAYKIN, 2001).

O algoritmo responsável pela formação do SOM começa inicializando os pesos sinápticos da grade, sendo que isso pode ser feito ao atribuir-lhes valores pequenos gerados de forma aleatória, fazendo com que nenhuma organização prévia seja imposta ao mapa. Assim que a grade tenha sido inicializada, há três processos envolvidos na formação do mapa: Competição, Cooperação e Adaptação Sináptica (HAYKIN, 2001).

No processo de competição, para cada padrão de entrada, os neurônios da grade calculam seus respectivos valores de uma função discriminante, sendo que essa função fornece a base para a competição entre os neurônios. O neurônio com maior valor da função discriminante é considerado o vencedor da competição. No processo de cooperação, o neurônio vencedor determina a localização espacial de uma vizinhança de neurônios excitados, fornecendo a base para a cooperação entre neurônios vizinhos. O processo da adaptação sináptica permite que os neurônios excitados aumentem seus valores individuais da função discriminante em relação ao padrão de entrada por meio de ajustes adequados aplicados a seus pesos sinápticos, tais ajustes fazem com que a resposta do neurônio vencedor à aplicação seguinte de um padrão de entrada semelhante seja melhorada.

**Figura 3 – Grade bidimensional**



Fonte: Adaptado de Haykin (2009)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados a serem utilizados neste trabalho foram fornecidos pelo banco de dados do Laboratório de Sistemas Inteligentes e do Laboratório de Processamento de Sinais e Aplicações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Cornélio Procópio.

A seguir, é descrito como a coleta para o banco de dados foi feita.

#### 3.1 Bancada de ensaios

O motor de indução trifásico utilizado foi um motor de 1HP e 1730 RPM. O motor CC, que foi utilizado como carga, possui potência de 2kW e tensão de alimentação de 250V e foi acoplado ao eixo do motor trifásico.

Os dados coletados foram referentes às seguintes falhas: desequilíbrio de tensões, barras de rotor quebradas e falhas no rolamento. Para o desequilíbrio de tensões foi necessário alterar a tensão de alimentação de uma das fases do motor. Para as outras duas falhas, foram substituídas as respectivas partes saudáveis do motor por componentes com problemas.

#### 3.2 Microfone Behringer ECM8000

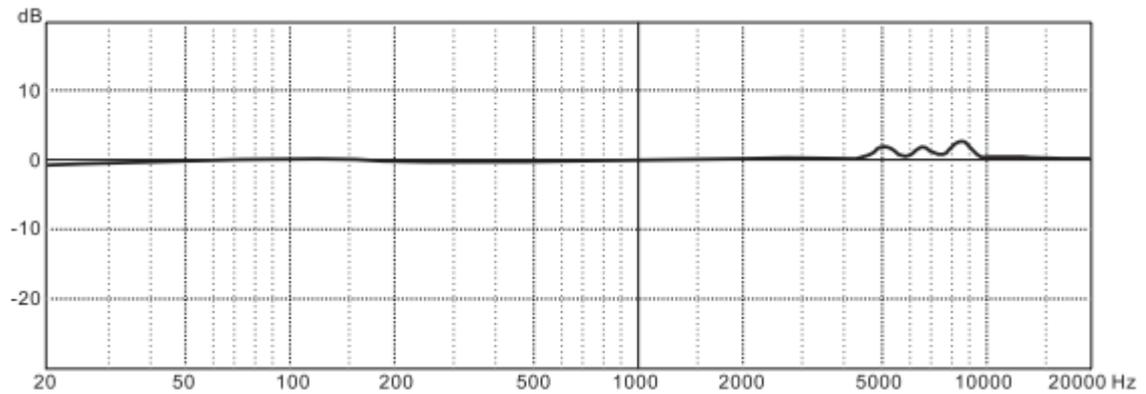
O sinal de áudio foi captado por um microfone condensador de eletreto omnidirecional Behringer ECM8000, que é mostrado na Figura 4. Esse microfone possui uma resposta em frequência linear, mostrada na Figura 5, com pequenas oscilações para frequências maiores que 4 kHz.

Figura 4 – Behringer ECM8000



Fonte: BEHRINGER (s.d.)

**Figura 5 – Resposta em frequência do microfone**



**Fonte: BEHRINGER (s.d.)**

O microfone foi ligado à interface de áudio USB Scarlet 2i2, da marca Focusrite, que serviu para a aquisição dos dados. A interface possui frequência de amostragem de até 192 ksamples/s e resolução máxima de 24 bits. O dispositivo é mostrado na Figura 6.

**Figura 6 – Focusrite Scarlet 2i2**



**Fonte: Thomann (2016)**

A interface comunicou-se diretamente com um computador executando o software MATLAB 2016b para a aquisição dos dados. A cada ensaio cerca de 30 segundos de áudio foram gravados.

### 3.3 Acelerômetro SR110A

O sinal de vibração do motor foi medido utilizando um acelerômetro do modelo SR110A, da marca PHD Sensors, mostrado na Figura 7.

**Figura 7 – Acelerômetro SR110A**



**Fonte: Autoria própria**

Para a aquisição do sinal de vibração foi utilizada uma placa de som USB genérica, mostrada na Figura 8.

**Figura 8 – Placa de som USB**



**Fonte: Autoria própria**

O acelerômetro foi fixado no motor e foi ligado a um módulo de vibração G-mac MTN 8066, da marca Monitran, mostrada na Figura 9. A G-mac MTN 8066 tem função de condicionar o sinal e, neste caso, foi ajustada para deixar passar frequências acima de 2 Hz e abaixo de 5 kHz. Após passar pela G-mac, o sinal foi coletado pela placa de som USB.

**Figura 9 – G-mac MTN 8066**

Fonte: Autoria própria

### 3.4 Análise dos sinais

Os sinais colhidos foram analisados utilizando o MATLAB 2016b. A análise foi feita em três etapas. A primeira foi encontrar o espectro de frequências. A segunda foi fazer uma análise visual e comparação dos espectros dos sinais para identificar como um sinal se comporta em relação a outros. E, por fim, a última foi extrair componentes de frequência a serem determinadas após a análise visual e utilizar o SOM para o agrupamento dos padrões. Para essa terceira etapa foi utilizada a *toolbox* SOM para MATLAB, desenvolvida por Vesanto et al. (2000).

Após a realização das etapas, será feita uma análise dos agrupamentos e, por fim, será feita uma comparação entre as similaridades dos sinais e suas características.

## 4 RESULTADOS

Os sinais coletados, tanto de áudio quanto de vibração, possuem variações de carga e na condição elétrica, desta forma, é possível comparar e verificar como o sinal comporta-se nas mais diferentes situações. O Quadro 1 a seguir mostra a condição elétrica de cada um dos sinais.

**Quadro 1 – Condição elétrica dos sinais**

Sinal	Condição do motor	Condição elétrica das fases
01 a 09 10 a 12 13 a 15 16 a 18 19 a 21	Saudável	Equilibrado A - 2% menor B - 2% maior, C - 2% menor A - 4% menor B - 4% maior, C - 4% menor
22 a 30 31 a 33 34 a 36 37 a 39 40 a 42	Falhas no rolamento	Equilibrado A - 2% menor B - 2% maior, C - 2% menor A - 4% menor B - 4% maior, C - 4% menor
43 a 51 52 a 54 55 a 57 58 a 60 61 a 63	Barras de rotor quebradas	Equilibrado A - 2% menor B - 2% maior, C - 2% menor A - 4% menor B - 4% maior, C - 4% menor

Fonte: Autoria própria

As cargas para os sinais com condição elétrica equilibrada foram de 0,4N a 4,5N. Já para os sinais com desequilíbrio elétrico, as cargas foram de 0,4N a 4N.

A seguir, será feita a comparação entre as FFT obtidas para os sinais de áudio e de vibração para explicitar as principais similaridades e diferenças entre as componentes de frequência deles. Também será feita uma comparação entre os sinais de cada tipo, de forma a mostrar como comportam-se para uma mesma condição mecânica mas com diferentes condições elétricas e cargas, e para uma mesma condição elétrica e carga mas com diferentes condições mecânicas.

Como constatado durante a análise, apenas o motor com problema no rolamento apresenta componentes acima dos 1000Hz, assim, os gráficos apresentados para ele mostrarão até a frequência de 3000Hz, enquanto os outros mostrarão até a frequência de 1000Hz.

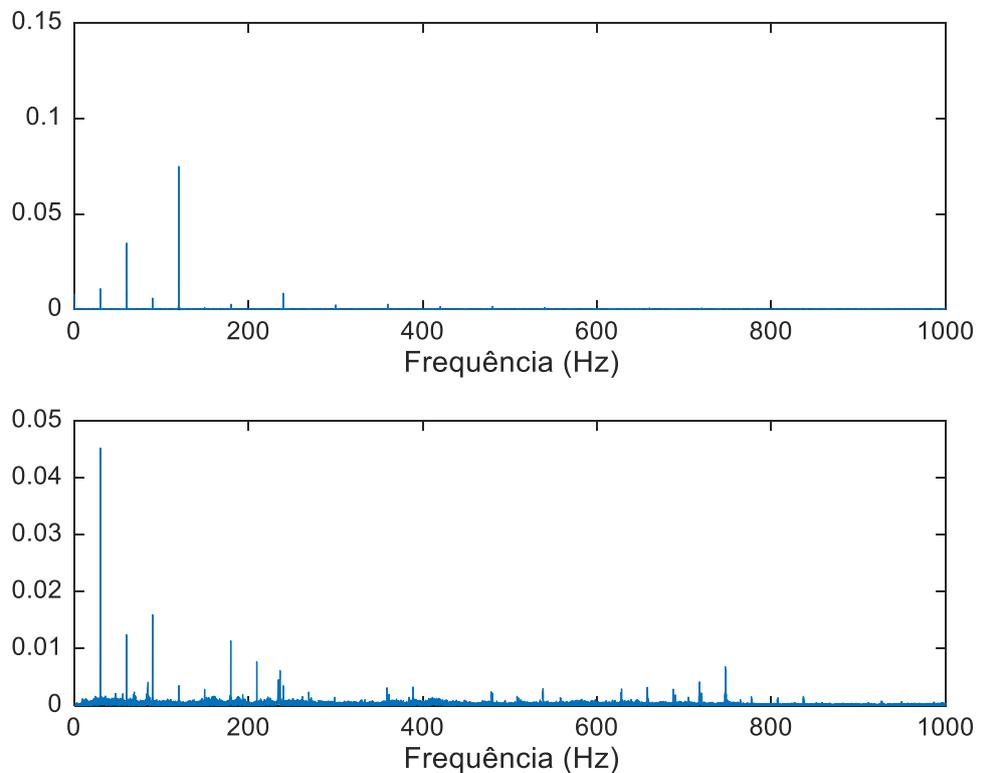
## 4.1 Motor saudável

### 4.1.1 Equilíbrio elétrico

Os primeiros casos a serem analisados são o motor saudável com equilíbrio na alimentação com diferentes valores de carga.

Para uma carga de 0,4N, mostrada na Figura 10, é possível notar três frequências de maior magnitude no sinal de vibração: 30Hz, 60Hz e 120Hz. Sendo a de 120Hz a de maior magnitude e a de 30Hz a de menor. No sinal de áudio, porém, é possível notar várias frequências, sendo as de maior magnitude 30Hz, 60Hz, 90Hz e 180Hz. Entre elas, a de maior magnitude é a de 30Hz enquanto a de menor magnitude é a de 60Hz.

**Figura 10 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

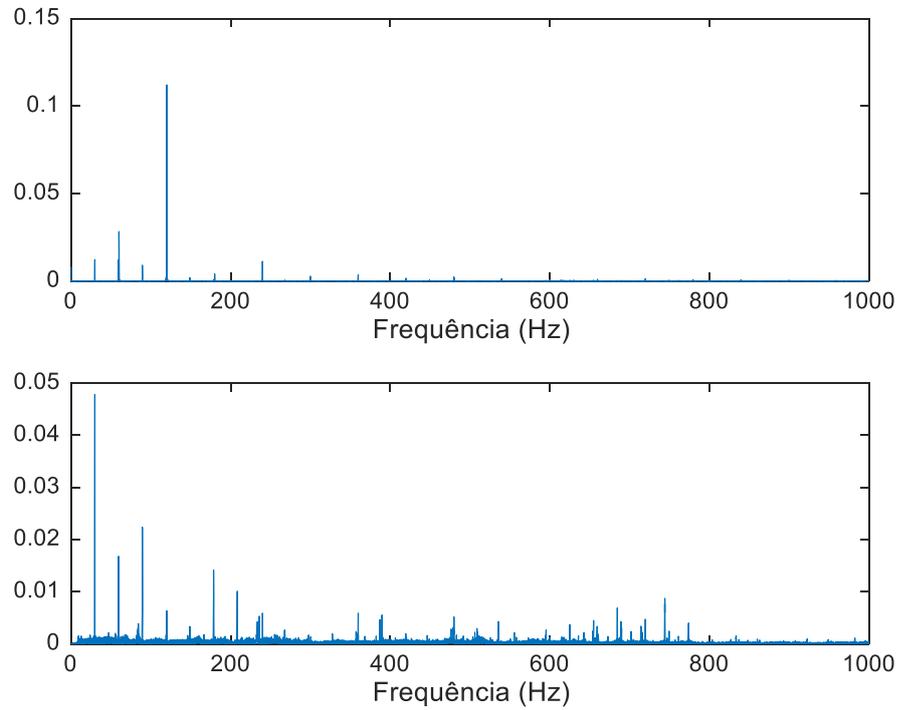
Ao comparar ambos os sinais, nota-se que são diferentes entre si. Enquanto o sinal de vibração possui poucas frequências e algumas de magnitude bem inferior às três mencionadas, o sinal de áudio possui várias que têm magnitudes próximas entre si e que não são muito inferiores à magnitude da componente de 60Hz. Analisando as frequências mencionadas no parágrafo anterior, vê-se que enquanto no sinal de vibração a frequência com maior magnitude é a de 120Hz, no sinal de áudio a frequência de 120Hz é praticamente insignificante. Da mesma forma, a frequência de 30Hz é a de maior magnitude no sinal de áudio, mas no sinal de vibração ela tem uma magnitude muito baixa. A magnitude da componente de 90Hz é muito baixa em relação às outras no sinal de vibração, mas no sinal de áudio ela é a segunda de maior magnitude. É possível ver que nos dois sinais a componente de 60Hz tem uma magnitude alta em relação a quase todas as outras, sendo que no sinal de vibração ela é a segunda maior e no sinal de áudio é a terceira. A componente de 180Hz é praticamente inexistente no sinal de vibração e no sinal de áudio tem magnitude bem próxima à componente de 60Hz.

Para uma carga de 1N, mostrada na Figura 11, ambos os sinais possuem o mesmo comportamento já explicitado anteriormente.

Ao comparar os sinais de vibração de 0,4N e 1N, nota-se que o aumento da carga fez com que a magnitude das componentes de 30Hz, 90Hz, 120Hz e 240Hz aumentassem e a de 60Hz diminuísse. Comparando os sinais de áudio, vê-se que a magnitude de todas as componentes aumentou.

Para 1,5N, Figura 12, ao comparar com a carga de 1N, o comportamento manteve-se nas componentes de 60Hz e 120Hz no sinal de vibração, sendo que a de 60Hz aumentou um pouco e a de 120Hz diminuiu um pouco, mas a componente de 30Hz praticamente igualou-se à componente de 90Hz e, agora, ambas são ligeiramente menores que a componente de 240Hz. No sinal de áudio a componente de 180Hz aumentou e ultrapassou a magnitude da componente de 60Hz, que diminuiu, enquanto as componentes de 30Hz e 120Hz mantiveram o mesmo comportamento mostrado anteriormente, porém suas magnitudes também diminuíram um pouco.

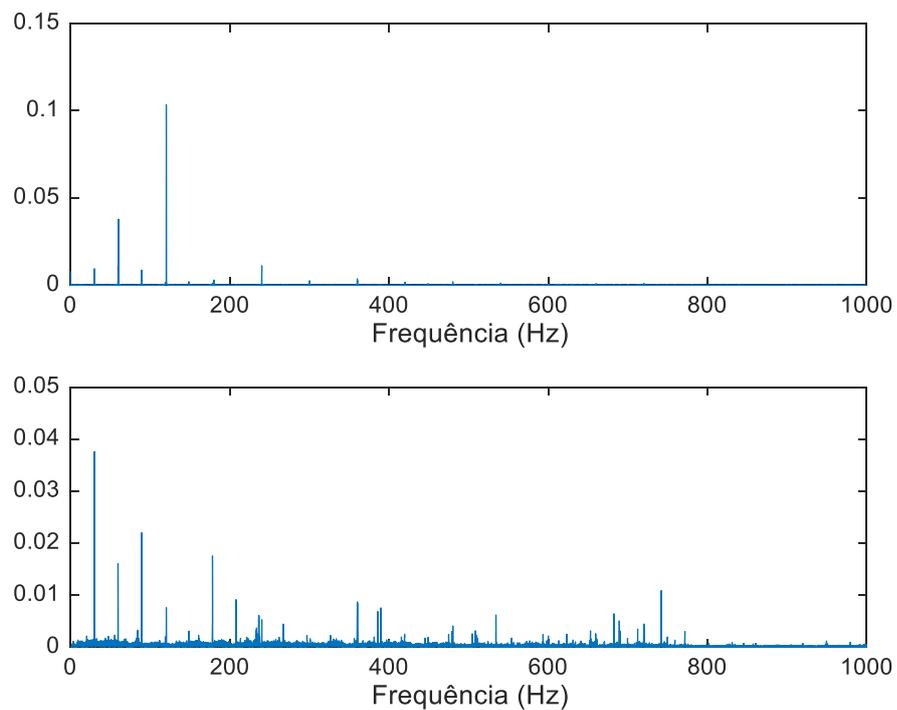
**Figura 11 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1N do motor saudável em equilíbrio**



**Fonte:**

**Autoria própria**

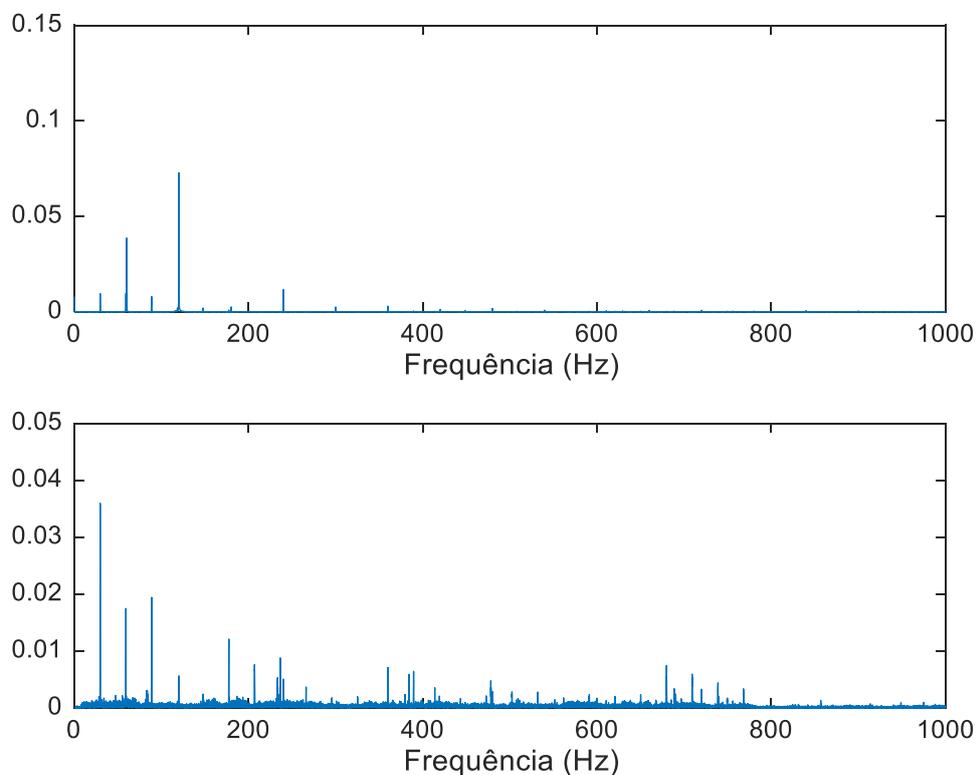
**Figura 12 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1,5N do motor saudável em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

Ao analisar a carga de 2N, Figura 13, nota-se que a componente de 120Hz do sinal de vibração diminuiu consideravelmente enquanto a de 60Hz aumentou um pouco e as outras mantiveram-se praticamente constantes em relação à carga de 1,5N. No sinal de áudio o comportamento visto para a carga de 0,4N repete-se, fazendo com que a componente de 60Hz volte a ser maior que a componente de 180Hz. As componentes de 30Hz, 90Hz e 180Hz diminuem enquanto a de 60Hz aumenta um pouco.

**Figura 13 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em equilíbrio**

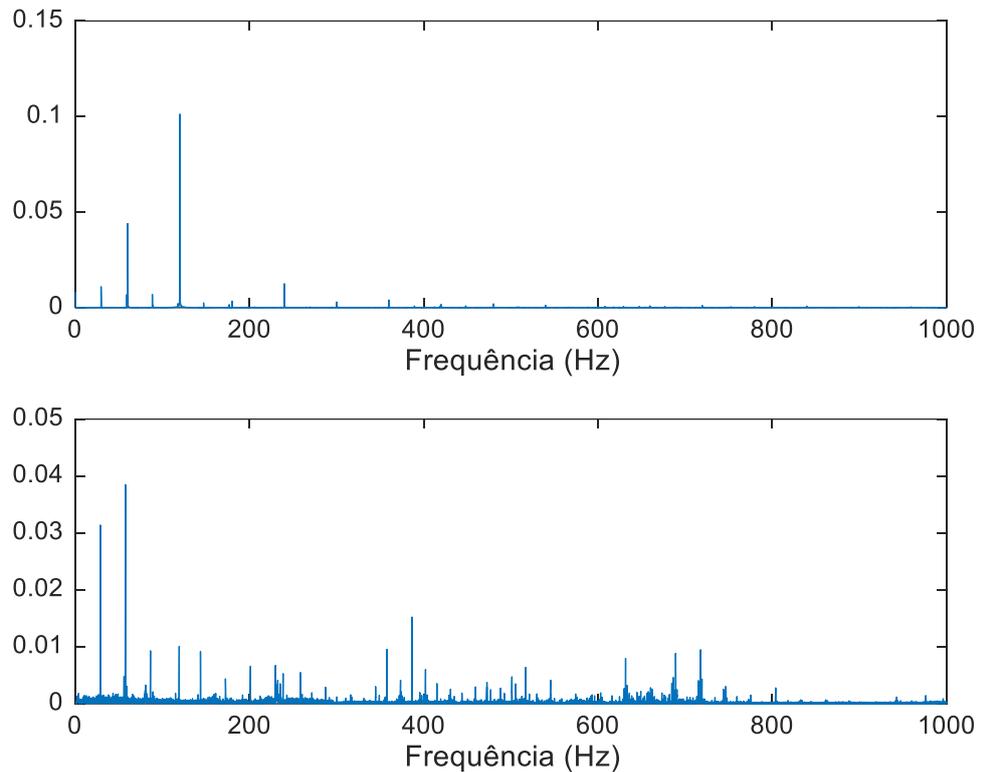


**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 14 vemos as FFT para a carga de 2,5N. No sinal de vibração as componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz aumentam enquanto a de 90Hz diminui, mas o comportamento mostrado anteriormente continua mantendo-se. No sinal de áudio o comportamento não se manteve. A componente de 60Hz, agora, é a de maior magnitude, superando a de 30Hz que até então era a maior. A componente de 30Hz diminuiu um pouco enquanto a de 60Hz aumentou significativamente. A componente de 90Hz caiu pela metade praticamente e a de 120Hz praticamente dobrou em relação

à carga de 2N. Nota-se também que a maior parte das componentes de frequência acima dos 200Hz aumentou também.

**Figura 14 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2,5N do motor saudável em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

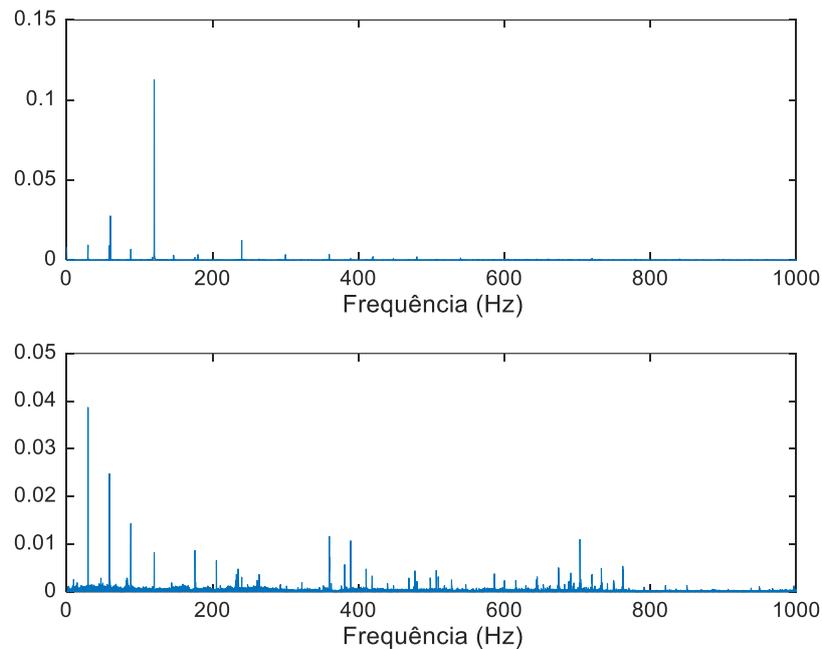
Analisando agora a carga de 3N, Figura 15, a componente de 120Hz volta a crescer enquanto as de 30Hz e 60Hz diminuem novamente, porém o comportamento visto anteriormente continua no sinal de vibração. No sinal de áudio a componente de 30Hz volta a crescer e ser a maior, mas o comportamento novamente não é mantido, visto que a componente de 60Hz diminui, mas é a segunda maior. A componente de 90Hz aumenta um pouco e a de 120Hz diminui.

Para a carga de 3,5N, Figura 16, nota-se que as componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz aumentam ligeiramente. No sinal de áudio o comportamento visto para a carga de 3N continua, porém as componentes de 30Hz e 90Hz diminuem um pouco enquanto as de 60Hz e 120Hz aumentam.

Para a carga de 4N, Figura 17, o comportamento mantém-se mais uma vez, mas, desta vez, as componentes de 60Hz e 120Hz diminuem enquanto a de 30Hz

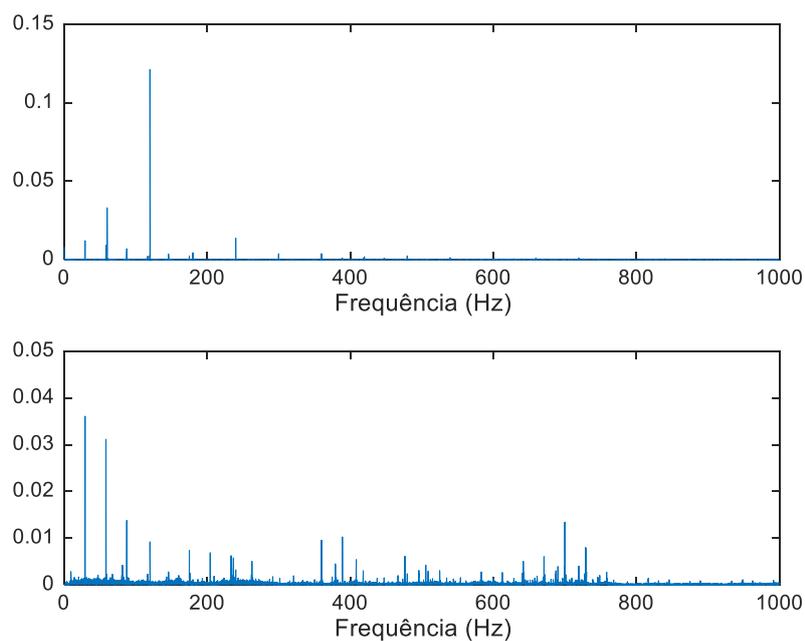
mantém-se praticamente constante. No sinal de áudio o comportamento manteve-se em relação ao sinal de áudio de 3,5N, porém todas as componentes diminuem.

**Figura 15 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3N do motor saudável em equilíbrio**



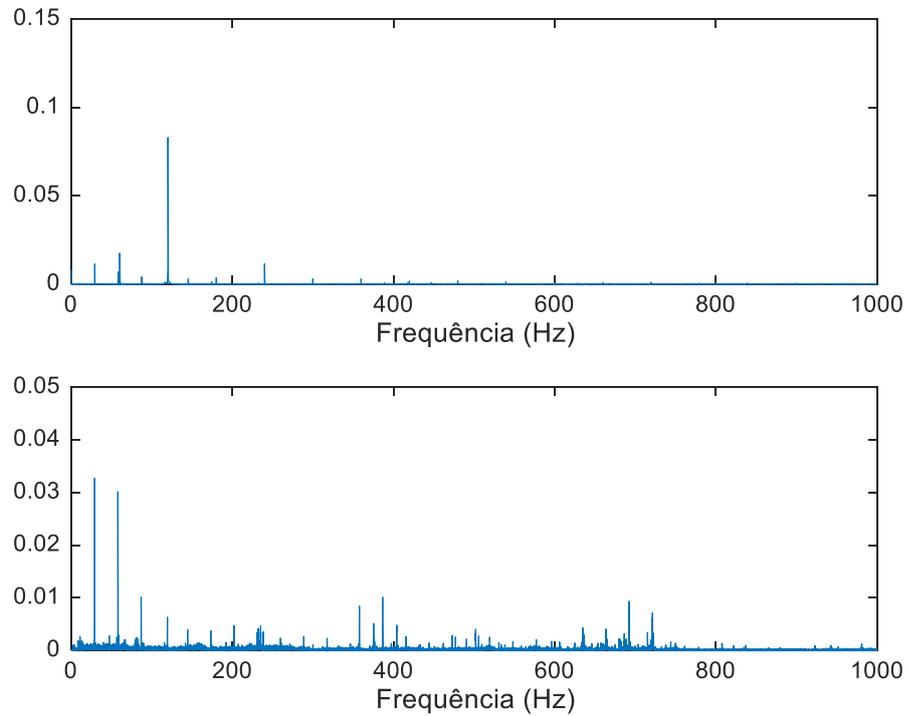
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 16 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3,5N do motor saudável em equilíbrio**



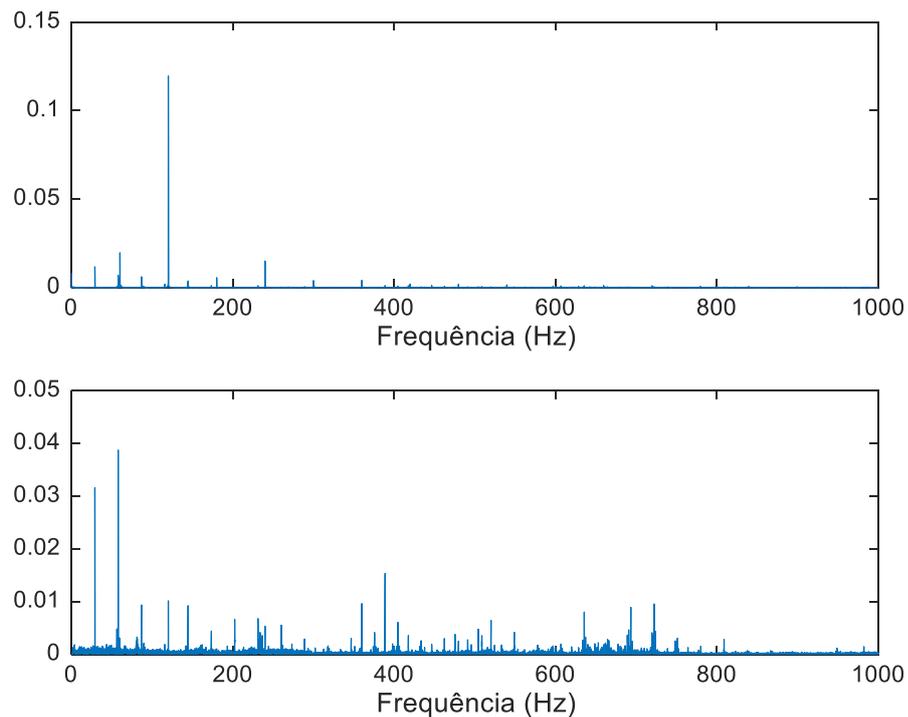
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 17 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 18 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4,5N do motor saudável em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4,5N, Figura 18, o comportamento manteve-se mais uma vez, com as componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz aumentando em comparação com a carga de 4N. No sinal de áudio a componente de 60Hz volta a se tornar a maior e as componentes de 30Hz, 90Hz diminuem um pouco. As outras componentes aumentam.

#### 4.1.2 Desequilíbrio elétrico

Para a primeira situação de desequilíbrio, com uma carga de 0,4N, Figura 19, nota-se que os padrões notados anteriormente ainda são vistos nela. Ao comparar com a amostra de 0,4N com equilíbrio elétrico, vê-se que a diferença no sinal de vibração está apenas na magnitude das componentes de frequência, sendo que elas são maiores no sinal do motor desequilibrado eletricamente, ou seja, é possível dizer que a vibração possui mais intensidade. O mesmo acontece com o sinal de áudio, todas as componentes de frequência possuem uma magnitude maior, tendo destaque a componente de 120Hz, que aumentou.

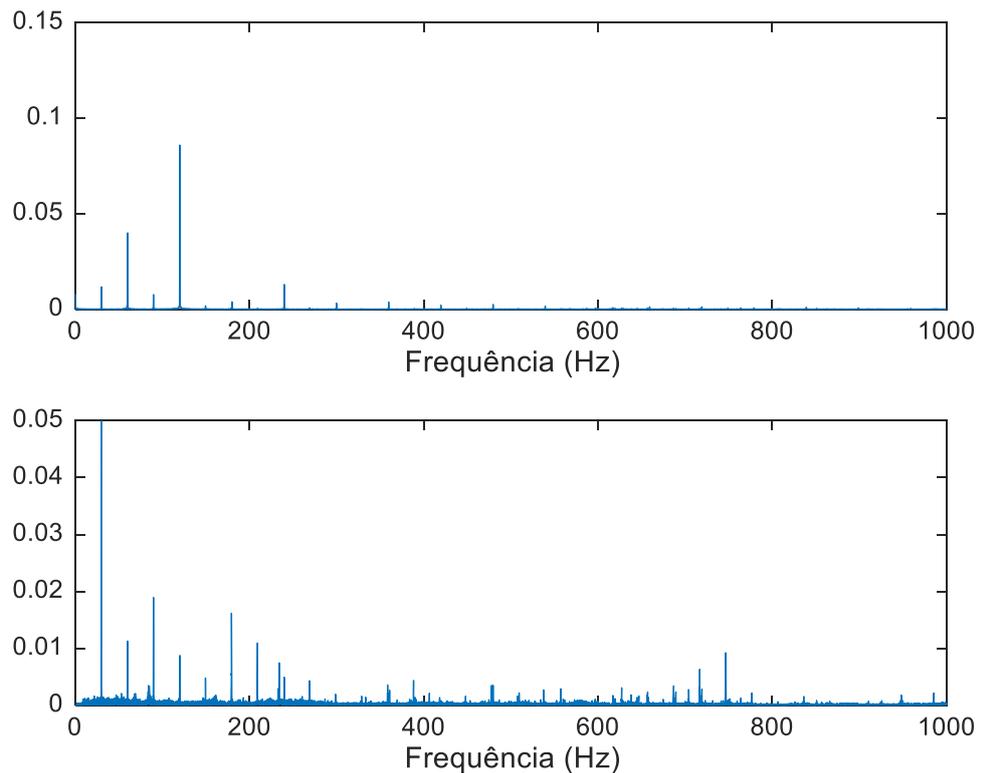
Analisando a carga de 2N, Figura 20, vê-se que ocorreu a situação contrária descrita para a carga de 0,4N. No sinal de vibração, a magnitude das componentes de 30Hz e 60 Hz diminuiu enquanto a de 120Hz aumentou. Comparando-o com a carga de 2N em equilíbrio elétrico, nota-se que a magnitude da componente de 120Hz cresceu enquanto as outras diminuíram. Analisando e comparando o sinal de áudio da carga de 2N com a de 0,4N, é possível ver que o padrão observado na maioria dos sinais de áudio anteriormente não se manteve. As componentes de 30Hz e 90Hz diminuíram enquanto as de 60Hz e 120Hz aumentaram, tendo a de 60Hz tornando-se a segunda maior magnitude. Comparando com o sinal de áudio da carga de 2N em equilíbrio, vê-se que as componentes de 30Hz e 90Hz diminuíram e as de 60Hz e 120Hz aumentaram, de forma semelhante ao que ocorreu na comparação anterior.

Para a carga de 4N, a última amostra da primeira situação de desequilíbrio, Figura 21, o sinal de vibração tem um aumento nas magnitudes das componentes de 60Hz, 120Hz e 240Hz, quando comparado com a carga de 2N em desequilíbrio e com a carga de 4N em equilíbrio. No sinal de áudio é possível ver um aumento na magnitude das componentes de 60Hz e 120Hz e uma queda na magnitude das

componentes de 30Hz e 90Hz, quando comparado com a carga de 2N em desequilíbrio e com carga de 4N em equilíbrio

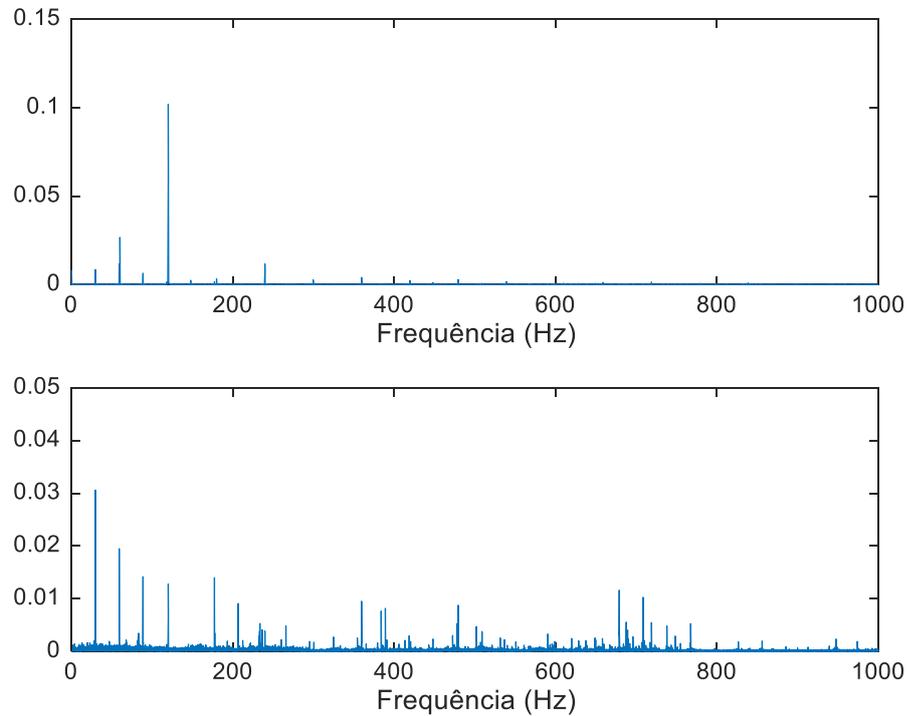
Analisando agora a segunda situação de desequilíbrio, para a carga de 0,4N, Figura 22, é possível ver um aumento considerável na componente de 120Hz em relação à carga de 0,4N em equilíbrio e na primeira situação de desequilíbrio no sinal de vibração, enquanto as outras componentes ficaram com valores próximos. No sinal de áudio as magnitudes em geral aumentaram em relação à carga de 0,4N em equilíbrio, e comparando-o com a carga de 0,4N em equilíbrio é possível ver que as componentes de 60Hz e 120Hz aumentaram e as outras ficaram com valores próximos.

**Figura 19 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 1**



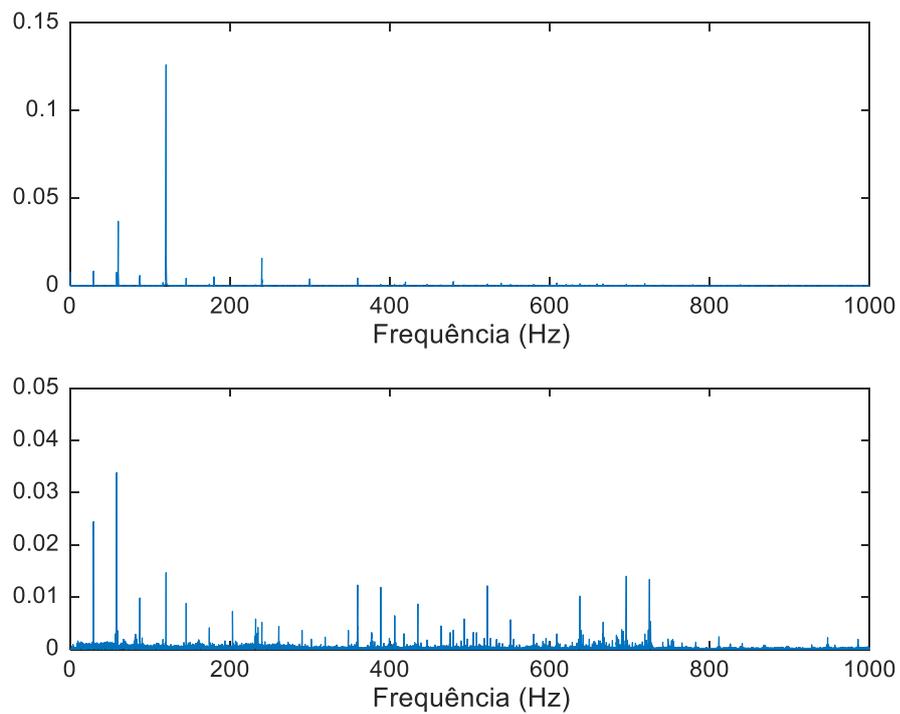
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 20 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 1**



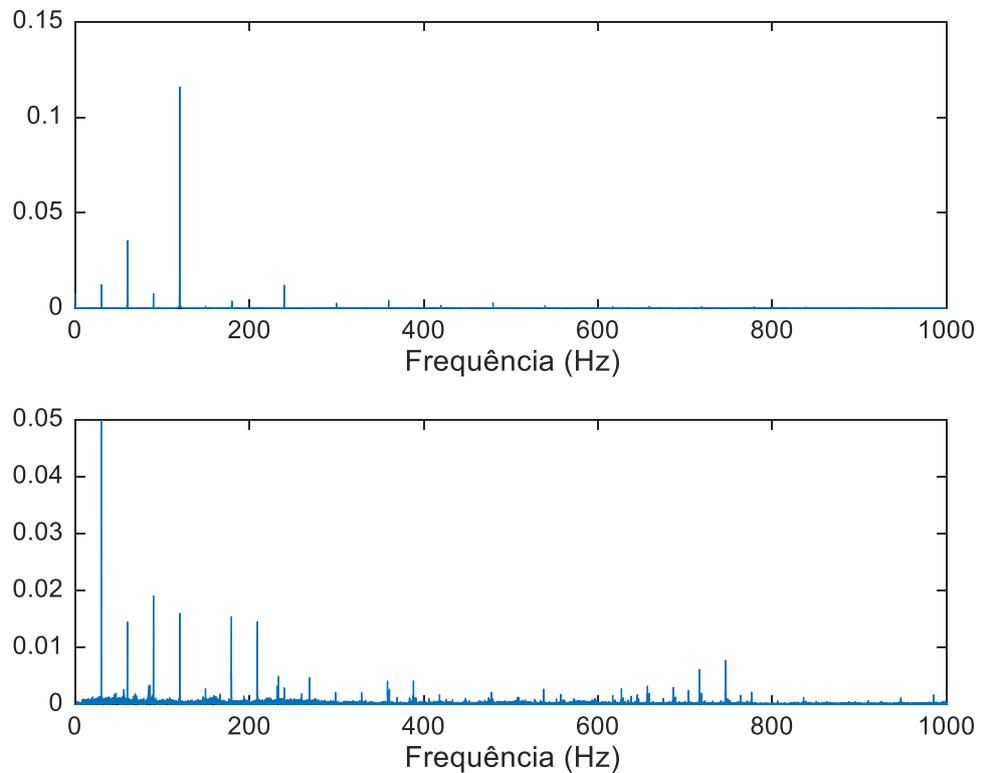
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 21 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 1**



**Fonte: Autoria própria**

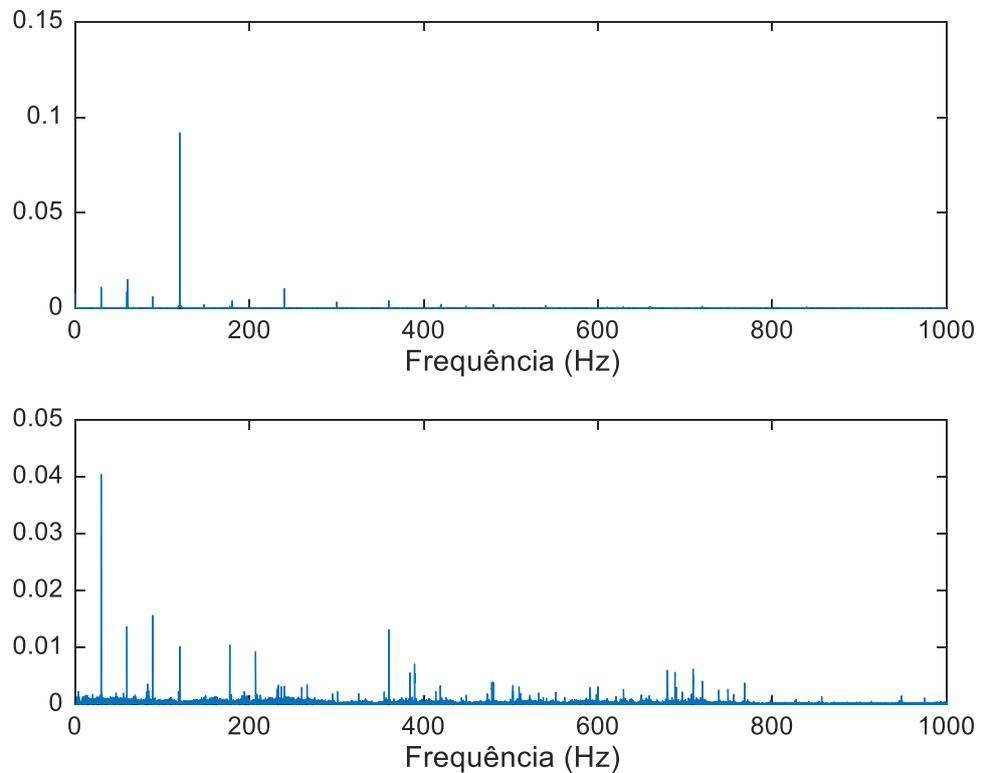
**Figura 22 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 2**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 23, vê-se uma queda na magnitude das componentes de 120Hz e 60Hz em relação às cargas de 0,4N na segunda situação de desequilíbrio e de 2N na primeira situação de desequilíbrio. Comparando-o com a carga de 2N em equilíbrio, vê-se que a componente de 120Hz aumentou e a de 60Hz diminuiu. Comparando o sinal de áudio com a carga de 0,4N na segunda situação de equilíbrio, vê-se que o padrão se manteve, mas as magnitudes diminuiram ligeiramente. Comparando-o com a carga de 2N em equilíbrio também vê-se que o padrão é o mesmo, tendo as componentes de 60Hz e 90Hz aumentado e as de 30Hz e 120Hz diminuído. E ao compará-lo com a carga de 2N na situação primeira situação de equilíbrio, nota-se que ambas não possuem o mesmo padrão, sendo que as componentes de 30Hz e 90Hz aumentaram e as de 60Hz e 120Hz diminuiram.

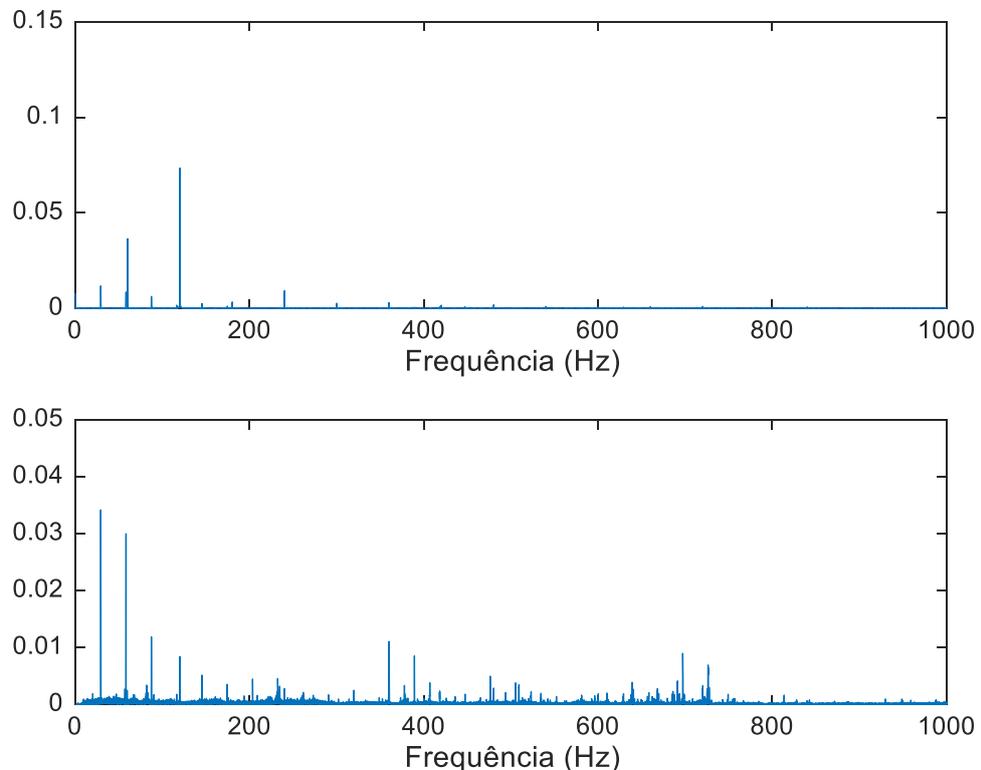
**Figura 23 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 2**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 24, é possível ver um aumento na componente de 60Hz enquanto a componente de 120Hz diminui no sinal de vibração quando comparado com a carga de 2N na segunda situação de desequilíbrio e com a carga de 4N em equilíbrio. Ao comparar com a carga de 4N na primeira situação de desequilíbrio, observa-se que a componente de 120Hz diminuiu consideravelmente e a de 60Hz manteve-se a um valor próximo. Comparando o sinal de áudio com a carga de 2N, nota-se um grande aumento na magnitude da componente de 60Hz e uma queda nas demais. Comparando com a carga de 4N em equilíbrio, vê-se que o padrão do sinal foi mantido e houve apenas uma pequena queda nas magnitudes. Já comparando com a carga de 4N na primeira situação de desequilíbrio, observa-se que os padrões do sinal são diferentes, sendo que as componentes de 30Hz e 90Hz aumentaram e as componentes de 60Hz e 120Hz diminuíram.

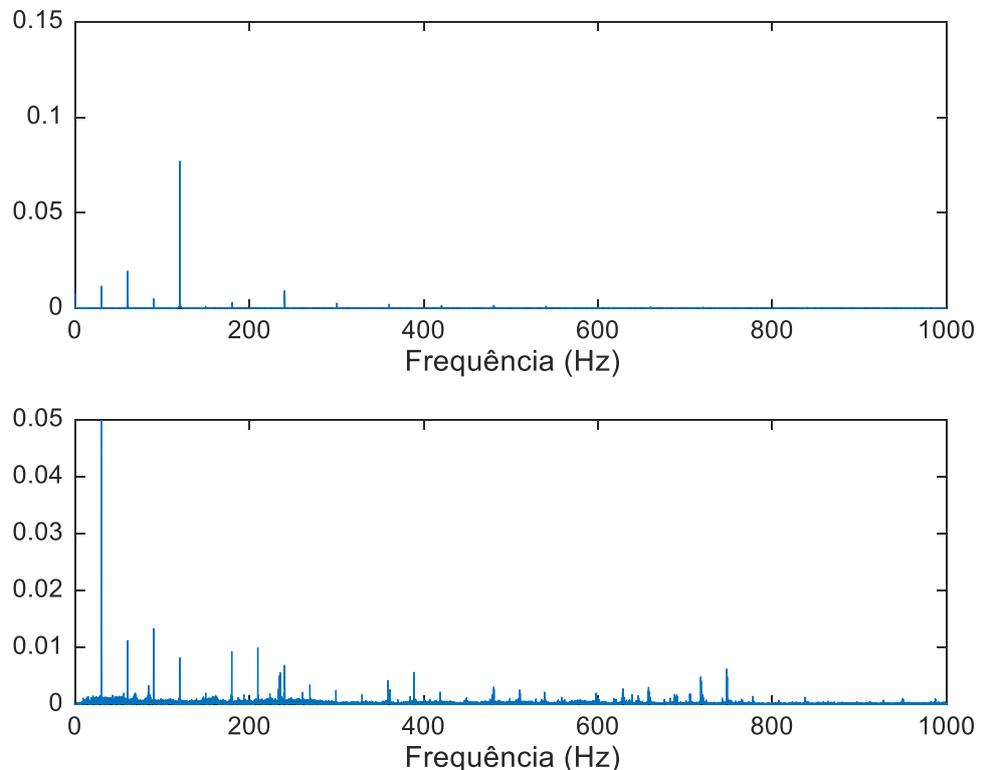
**Figura 24 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 2**



**Fonte: Autoria própria**

Para a terceira condição de desequilíbrio, com a carga de 0,4N, Figura 25, o sinal de vibração mantém o padrão já visto, quando comparado com as duas situações de desequilíbrio descritas anteriormente, e possui componentes de frequência de magnitude menor, já comparando com a carga de 0,4N em equilíbrio, vê-se que a componente de 60Hz é menor enquanto a componente de 120Hz é maior. O sinal de áudio também mantém o mesmo padrão visto nas duas condições de desequilíbrio e na de equilíbrio. Quando comparado com a carga de 0,4 na situação de desequilíbrio 1, vê-se que as componentes de 90Hz e 180Hz são menores e as de 30Hz, 60Hz e 120Hz mantiveram-se em valores próximos. Comparando-o com a carga de 0,4N na situação de desequilíbrio 2, observa-se que, com exceção da componente de 30Hz, as outras possuem magnitude menor. Por fim, comparando com a situação de equilíbrio, vê-se que as componentes de 30Hz e 120Hz são maiores enquanto as outras são menores.

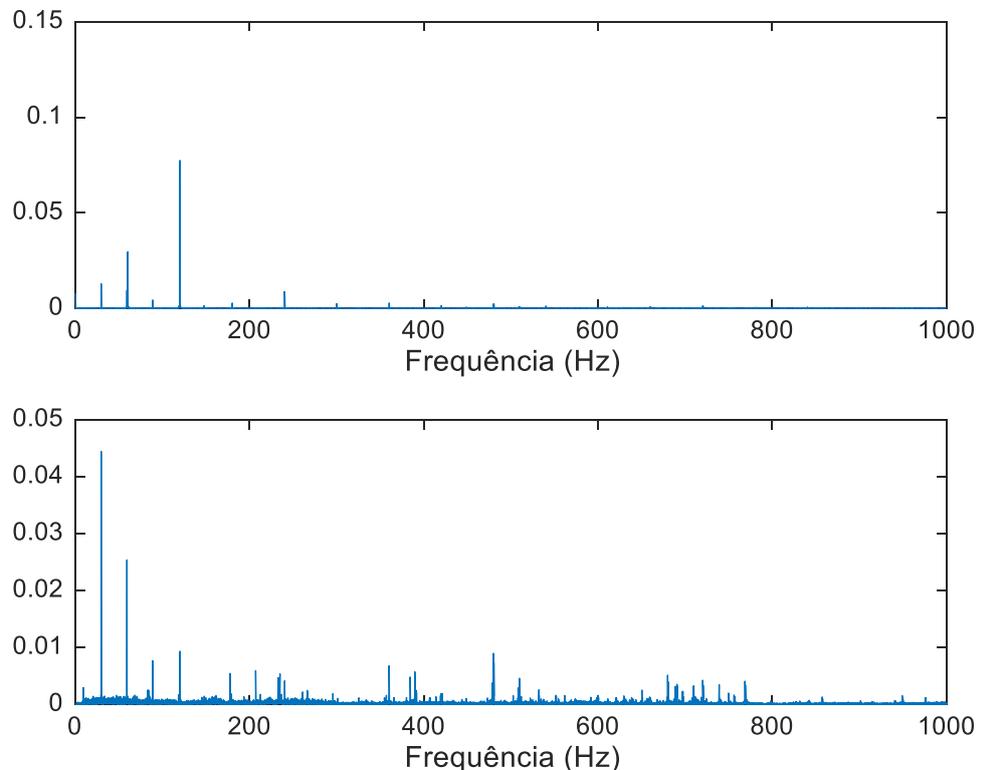
**Figura 25 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 3**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 26, o sinal de vibração, comparado com o sinal da carga de 0,4N, tem as componentes de 30Hz e 60Hz são maiores e a de 120Hz possui praticamente o mesmo valor. Comparando com a primeira e a segunda situações de desequilíbrio, é possível ver que as componentes de 30Hz e 60Hz são maiores e a de 120Hz é menor. Comparando com a situação de equilíbrio, observa-se que as componentes de 30Hz e 120Hz são maiores, enquanto a de 60Hz é menor. O sinal de áudio, comparado com a carga de 0,4N, tem as magnitudes das componentes de 30Hz e 90Hz menores, enquanto as componentes de 60Hz e 120Hz. Comparando com a primeira situação de desequilíbrio, observa-se que possuem o mesmo padrão, sendo que as componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz agora são maiores e a de 90Hz é menor. Comparando com a segunda situação de desequilíbrio, vê-se que as componentes de 30Hz e 120Hz são menores e as de 60Hz e 90Hz são maiores. Por fim, comparando com a situação de equilíbrio, as componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz são maiores e a de 90 é menor.

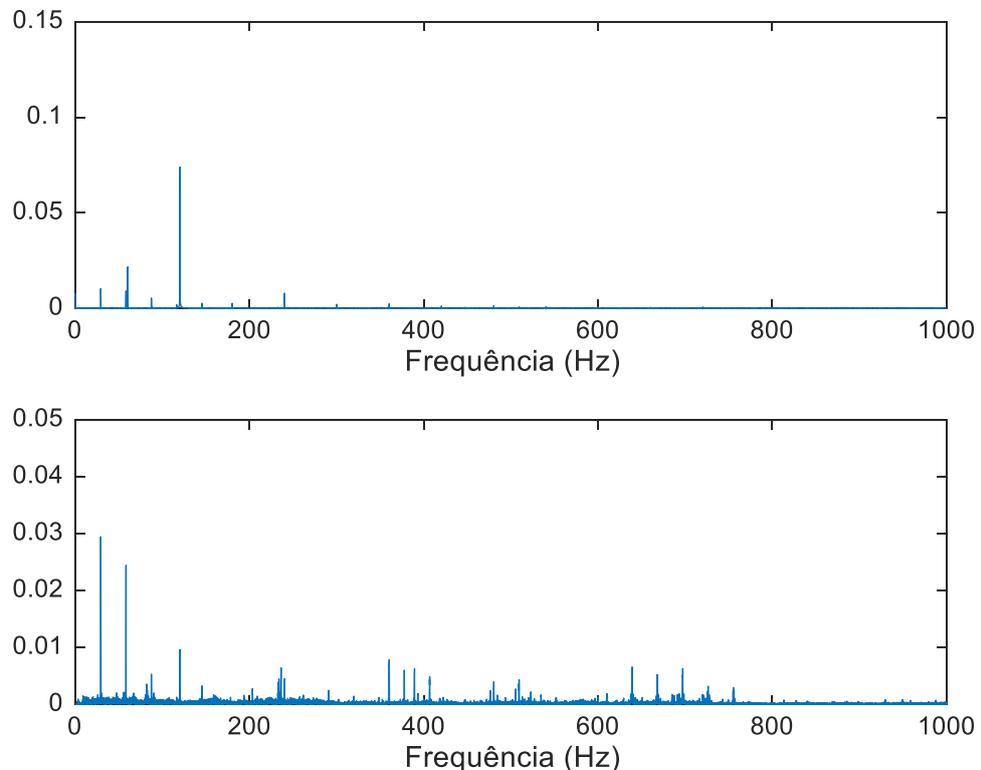
**Figura 26 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 3**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 27, comparando com o sinal de vibração da carga de 2N, vê-se que as magnitudes ficaram maiores. Comparando com a primeira situação de desequilíbrio, nota-se que apenas a de 30Hz ficou ligeiramente maior enquanto as outras ficaram menores. Comparando com a segunda situação de desequilíbrio, vê-se que as componentes de 30Hz e 60Hz ficaram menores e a de 120Hz ficou praticamente no mesmo valor. Por fim, comparando com a situação de equilíbrio, vê-se que as componentes de 30Hz e 120Hz ficaram menores e a de 60 ficou maior. Para o sinal de áudio, ao compará-lo com a carga de 2N, nota-se que o padrão se manteve, mas as magnitudes diminuíram. Comparando com a primeira situação de desequilíbrio, vê-se que a componente de 30Hz é maior enquanto as outras são menores. Comparando com a segunda situação de desequilíbrio, vê-se que o padrão, novamente, manteve-se, mas as magnitudes ficaram menores. Por fim, comparando com a situação de equilíbrio, novamente nota-se que o padrão se manteve, sendo que a magnitude da componente de 120Hz aumentou e as outras diminuíram.

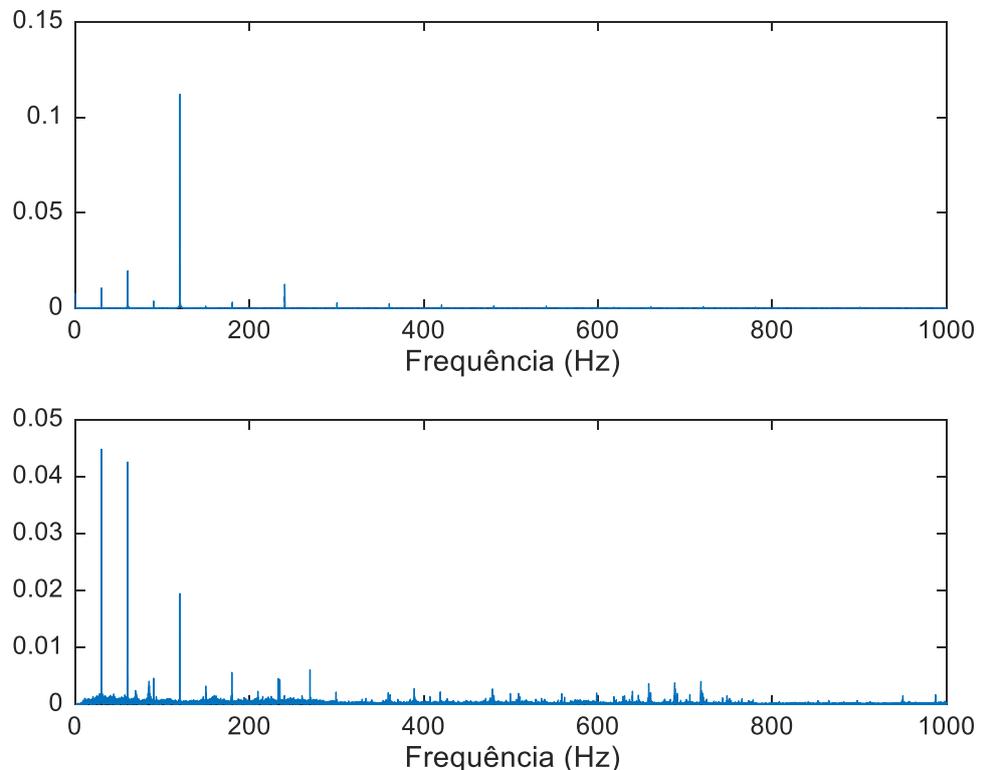
**Figura 27 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 3**



**Fonte: Autoria própria**

Para a quarta situação de desequilíbrio, com carga de 0,4, Figura 28, o sinal de vibração possui uma componente de 120Hz maior quando comparado com a situação de equilíbrio e as primeira e terceira situações de desequilíbrio. Comparando com a segunda situação de desequilíbrio, vê-se que todas as magnitudes são menores. A componente de 60Hz é menor quando comparada com a situação de equilíbrio e as primeira e segunda situações de desequilíbrio. A componente de 30Hz não teve variações significantes comparada a todas as outras situações. O sinal de áudio não manteve o mesmo padrão já visto. A componente de 30Hz foi menor do que nas outras situações de desequilíbrio e manteve aproximadamente o mesmo valor que a situação de equilíbrio. A componente de 60Hz foi significativamente maior em relação a todas as outras situações. Já a componente de 90Hz foi menor do que nas outras situações de desequilíbrio e teve aproximadamente o mesmo valor da situação de equilíbrio. Por fim, a componente de 120Hz foi maior que em todos os outros casos.

**Figura 28 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor saudável em desequilíbrio 4**



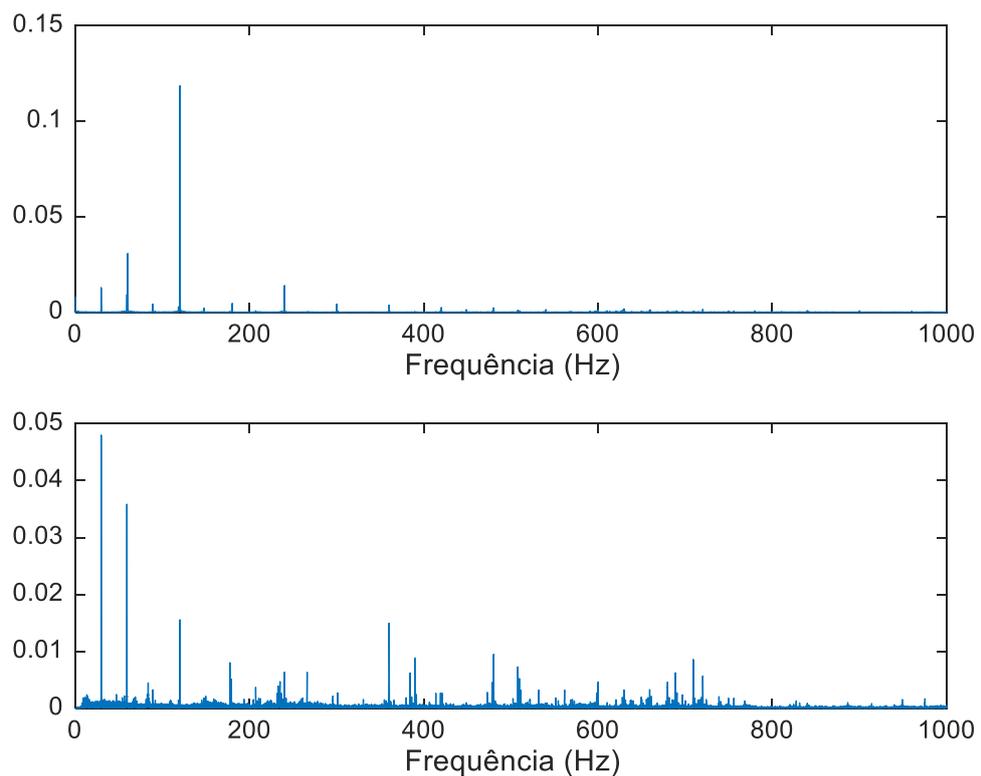
**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 29, o sinal de vibração possui a maior magnitude na componente de 120Hz em comparação aos outros casos. A componente de 60Hz foi maior do que em todos os casos de desequilíbrio e ligeiramente menor do que o caso de equilíbrio. A componente de 30Hz teve valor próximo ao visto na terceira situação de desequilíbrio, e foi ligeiramente maior que nos outros casos. O sinal de áudio foi parecido com o que foi visto para a carga de 0,4N, sendo que a magnitude da componente de 30Hz aumentou e as demais diminuíram. As componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz tiveram a maior magnitude em relação aos casos de desequilíbrio e equilíbrio enquanto a de 90Hz teve a menor.

Para a carga de 4N, Figura 30, a componente de 120Hz do sinal de vibração foi menor em relação à carga de 2N, à situação de equilíbrio e à primeira situação de equilíbrio, e nas outras situações foi maior. A componente de 60Hz foi a menor em relação aos outros casos. A componente de 30Hz foi menor se comparada ao sinal da carga de 2N e à segunda situação de desequilíbrio, e foi maior se comparada à primeira situação de desequilíbrio. Nos demais casos os valores foram

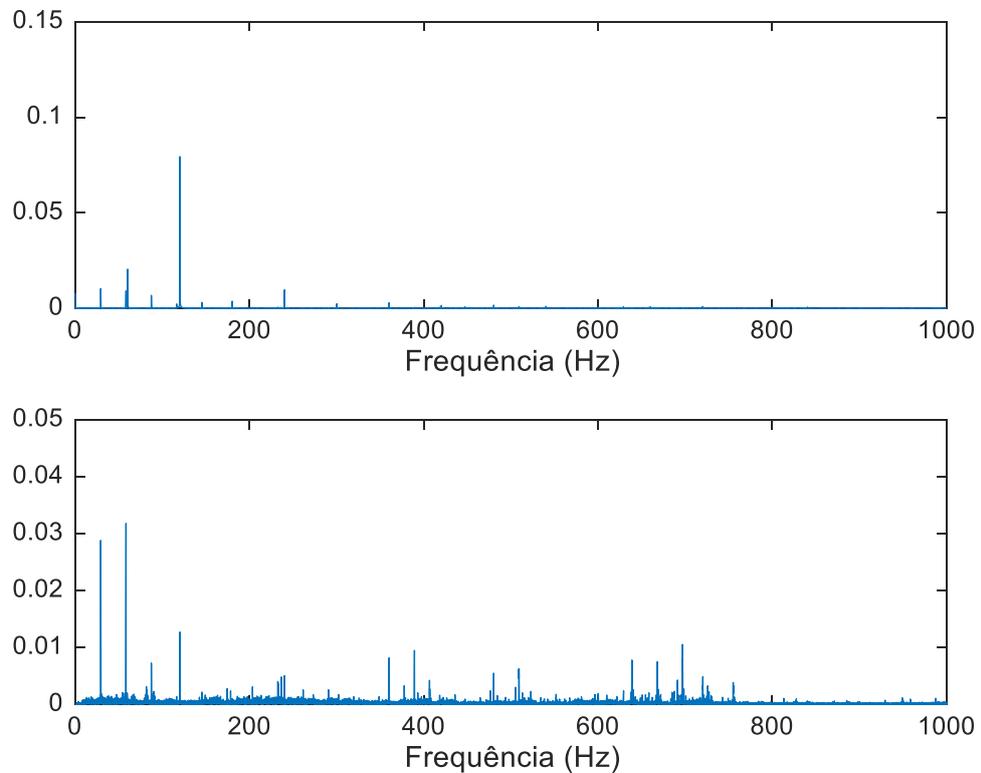
muito próximos. O sinal de áudio possui o mesmo padrão visto na primeira situação de desequilíbrio e na situação de equilíbrio, sendo que as magnitudes das componentes de 30Hz, 60Hz e 90Hz foram menores em relação à situação de equilíbrio e a de 120Hz foi maior. Em relação à primeira situação de desequilíbrio, as componentes de 60Hz, 90Hz e 120Hz foram menores e a de 30Hz foi maior. A componente de 30Hz foi menor em relação à segunda e à terceira situações de desequilíbrio, enquanto a de 60Hz foi maior. A componente de 90Hz foi menor em relação à segunda situação de desequilíbrio e maior em relação à terceira situação de desequilíbrio. Por fim, a componente de 120Hz foi maior em relação à segunda e à terceira situações de desequilíbrio.

**Figura 29 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor saudável em desequilíbrio 4**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 30 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor saudável em desequilíbrio 4**



Fonte: Autoria própria

## 4.2 Barras de rotor quebradas

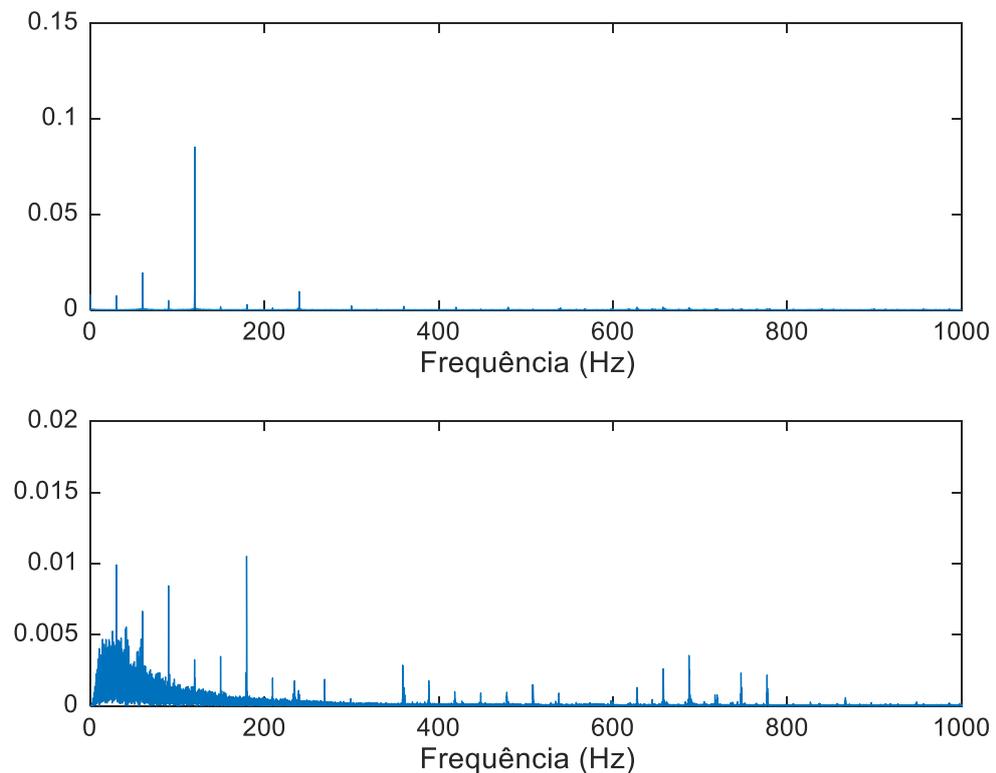
A seguir será feita a análise para os casos em que as barras do rotor estão quebradas.

### 4.2.1 Equilíbrio elétrico

Para a carga de 0,4N, Figura 31, o sinal de vibração possui o mesmo padrão visto anteriormente, tendo a componente de 120Hz com maior magnitude, seguida da de 60Hz e por fim as componentes de 30Hz e 240Hz. Comparando com o sinal do motor saudável para a mesma carga, é visto que a componente de 120Hz tem maior intensidade, enquanto as outras possuem menor intensidade. No sinal de áudio nenhum dos padrões vistos anteriormente se encaixam aqui, sendo a

componente de 180Hz a com a maior intensidade, seguida pelas componentes de 30Hz, 90Hz e 60Hz. Em comparação com o motor saudável para a mesma carga, é visível que todas as componentes possuem menor intensidade, porém, nota-se um grande ruído nas frequências iniciais e, conforme será visto também nas próximas análises dos sinais, é uma característica do sinal de áudio para esse tipo de problema.

**Figura 31 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**

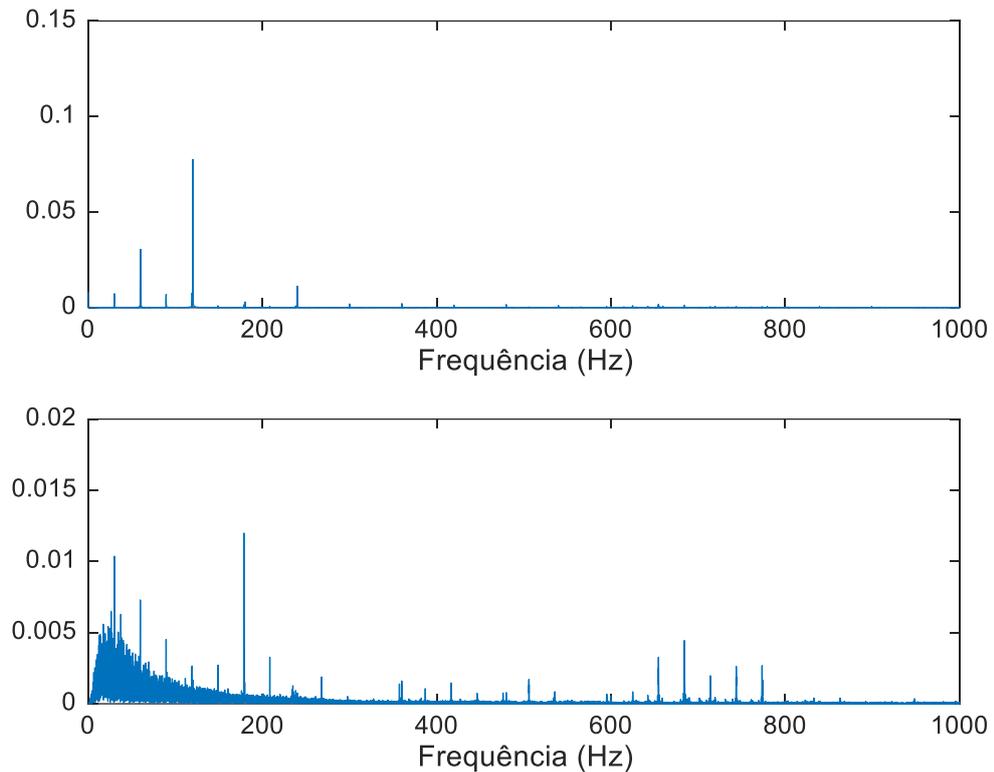


**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 1N, Figura 32, o sinal de vibração possui uma componente de 120Hz com magnitude menor quando comparado ao sinal da carga de 0,4N e ao sinal equivalente no motor saudável, enquanto isso a componente de 60Hz possui magnitude maior que nos dois casos. No sinal de áudio é possível observar, novamente, o ruído característico do problema. Comparando-o com o sinal da carga de 0,4N, vê-se que a magnitude das componentes de 90Hz e 120Hz diminuem enquanto as outras aumentam. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, nota-se que a intensidade das componentes é menor, sendo que, agora, a

de maior intensidade é a de 180Hz, enquanto no outro é a de 30Hz. Ainda há algumas componentes entre 600Hz e 800Hz que possuem magnitude relevante.

**Figura 32 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**



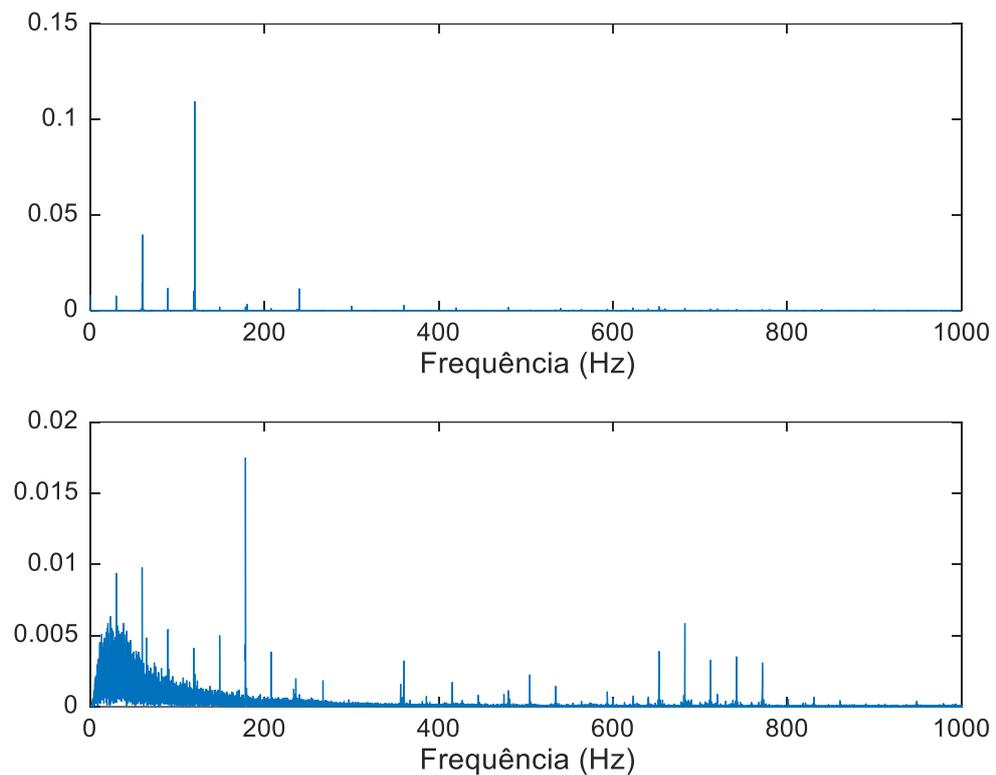
**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 1,5N, Figura 33, a magnitude das componentes de 60Hz, 90Hz e 120Hz do sinal de vibração é maior do que no sinal da carga de 1N e do sinal equivalente para o motor saudável. O sinal de áudio possui o ruído característico, além das intensidades das componentes serem menores do que nos casos da carga de 1N e do sinal equivalente do motor saudável. Novamente a componente de 180Hz possui a maior intensidade.

Para a carga de 2N, Figura 34, a magnitude componente de 120Hz é menor do que no sinal da carga de 1,5N e maior do que no sinal equivalente do motor saudável. A componente de 60Hz é maior do que em ambos os sinais. No sinal de áudio, a componente de 180Hz novamente é a de maior intensidade, porém, neste caso, ela está somente um pouco maior do que a componente de 30Hz. Em relação

ao sinal da carga de 1,5N, com exceção da componente de 30Hz, as outras possuem menor intensidade.

**Figura 33 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1,5N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**

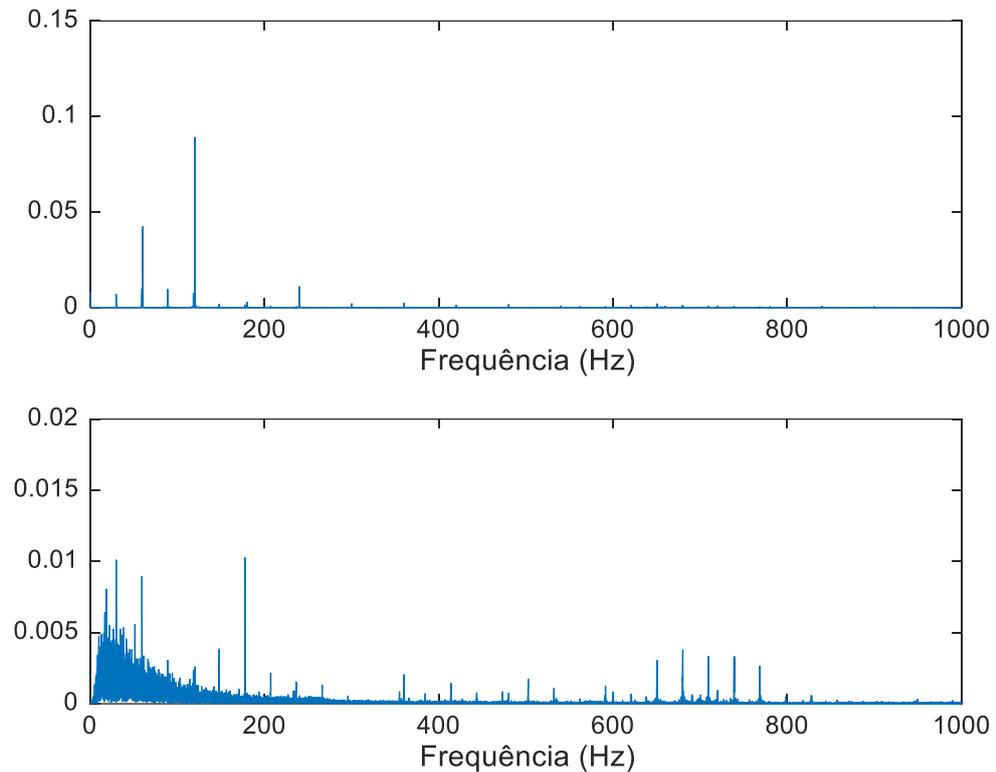


**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 3N, Figura 35, no sinal de vibração é possível notar o mesmo padrão visto anteriormente, porém, também se nota que há uma componente de magnitude menor bem próxima das componentes de 60Hz e 120Hz. Comparando com o sinal equivalente para o motor saudável, vê-se que a magnitude da componente de 90Hz aumentou enquanto as outras diminuíram. Comparando-o com o sinal da carga de 2N, vê-se que as componentes de 90Hz e 120Hz aumentaram enquanto as outras diminuíram. No sinal de áudio observa-se que o padrão visto anteriormente para o problema não se manteve, já que a componente de 180Hz não é mais a de maior magnitude, sendo menor do que as componentes de 30Hz, 60Hz e 150Hz, porém o ruído ainda é visto no sinal. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, vê-se que as magnitudes, novamente, são inferiores. Em relação ao sinal

da carga de 2N, vê-se que a magnitude das componentes de 120Hz e 150Hz aumentaram enquanto as outras diminuíram.

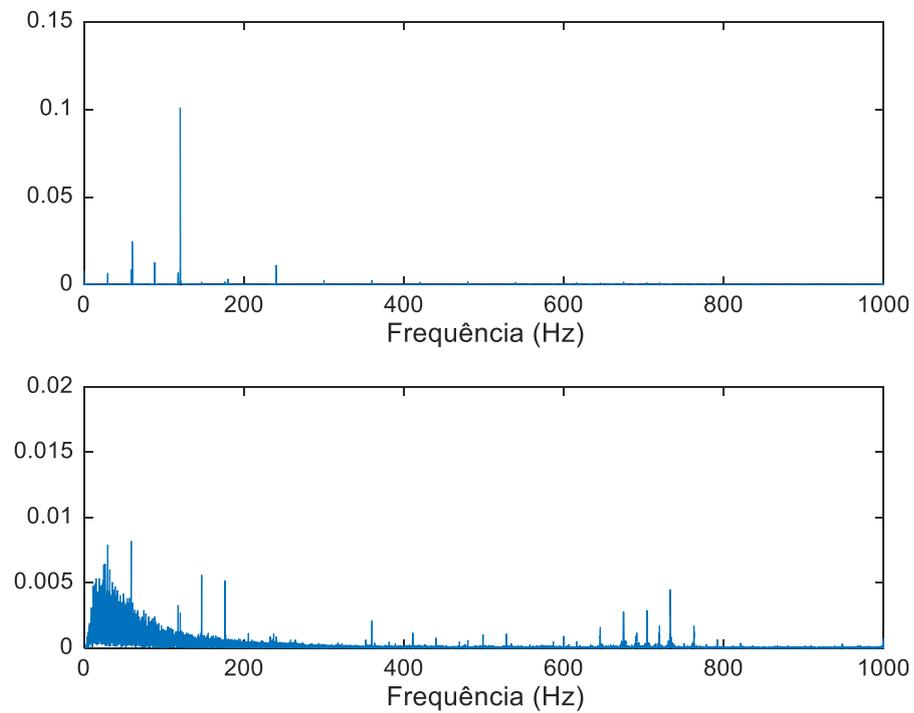
**Figura 34 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

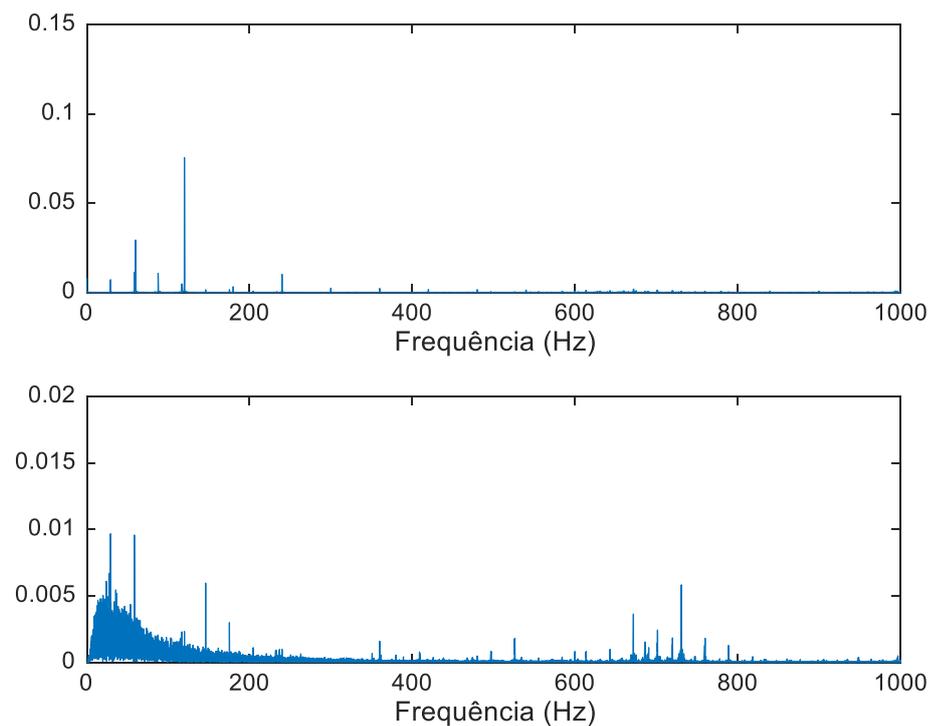
Para a carga de 3,5N, Figura 36, o sinal de vibração comporta-se da mesma maneira do que a descrita para a carga de 3N, tendo pequenas componentes ao lado das componentes de 60Hz e 120Hz, sendo as magnitudes das componentes de 30Hz e 60Hz maiores e as de 90Hz e 120Hz menores. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, vê-se que a magnitude da componente de 90Hz aumentou enquanto as outras diminuíram. No sinal de áudio, novamente, a componente de 180Hz não foi a maior, tendo diminuído em relação ao sinal da carga de 3N, enquanto as outras componentes tiveram magnitude maior. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes continuam inferiores e o ruído característico continua presente.

**Figura 35 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 36 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3,5N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**

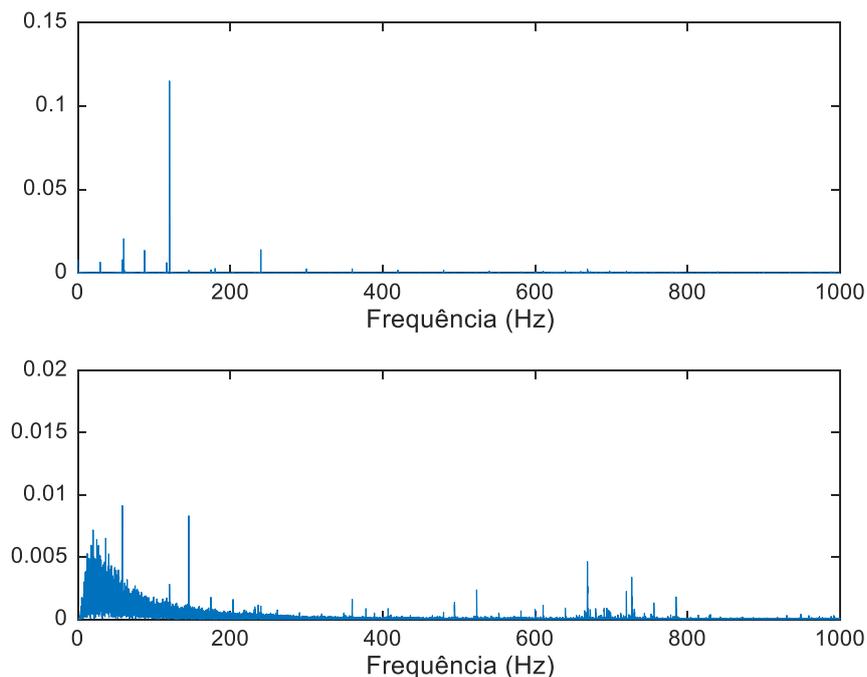


**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 37, o sinal de vibração continua com componentes de baixa magnitude bem próximas das componentes de 60Hz e 120Hz. Em relação ao sinal da carga de 3N, a magnitude da componente de 60Hz diminuiu enquanto as outras aumentaram. Comparando com o sinal equivalente do motor saudável, as componentes de 60Hz, 90Hz, 120Hz e 240Hz são maiores enquanto a de 30Hz é menor. No sinal de áudio as componentes de 60Hz e 150Hz, sendo que a de 150Hz aumentou e as outras diminuíram. Comparando com o sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes continuam menores e o ruído e o ruído continua presente.

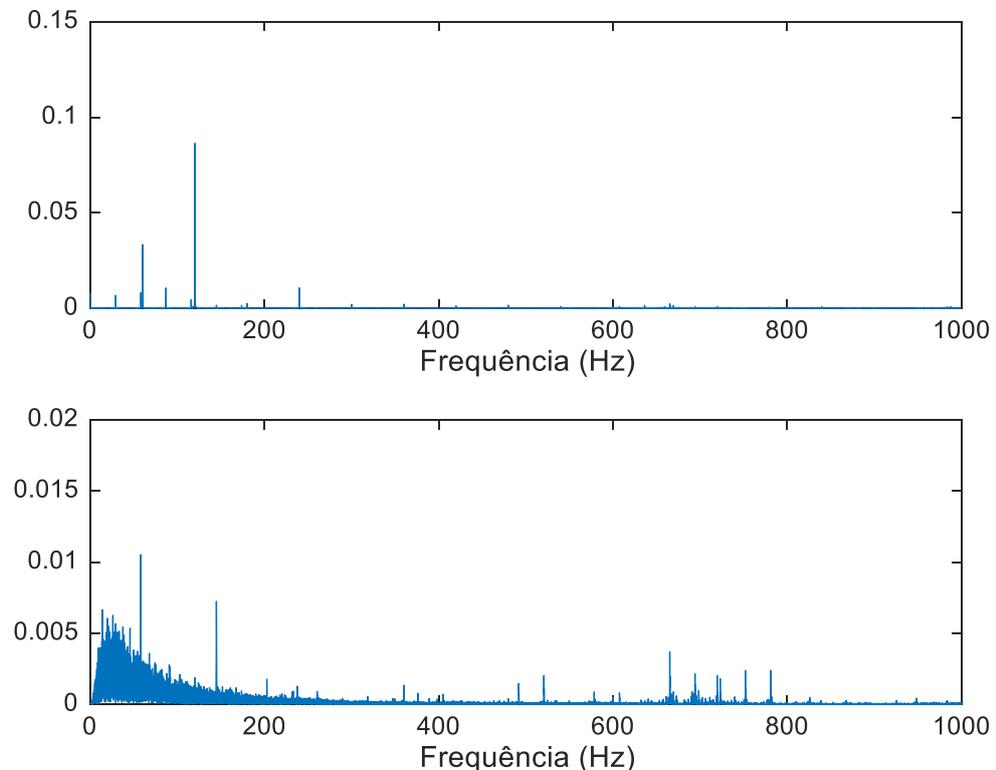
Para a carga de 4,5N, Figura 38, o sinal de vibração continua com o mesmo padrão já visto, sendo que a magnitude da componente de 60Hz aumentou em relação ao sinal da carga de 4N enquanto as outras diminuíram. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, vê-se que as magnitudes das componentes de 60Hz e 90Hz aumentaram enquanto as outras diminuíram. O sinal de áudio, novamente, possui as componentes de 60Hz e 150Hz com destaque, sendo a de 60Hz maior em relação ao sinal da carga de 4N e a de 150Hz menor. O ruído continua presente e as magnitudes são menores em relação ao sinal equivalente do motor saudável.

**Figura 37 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 38 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4,5N do motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio**

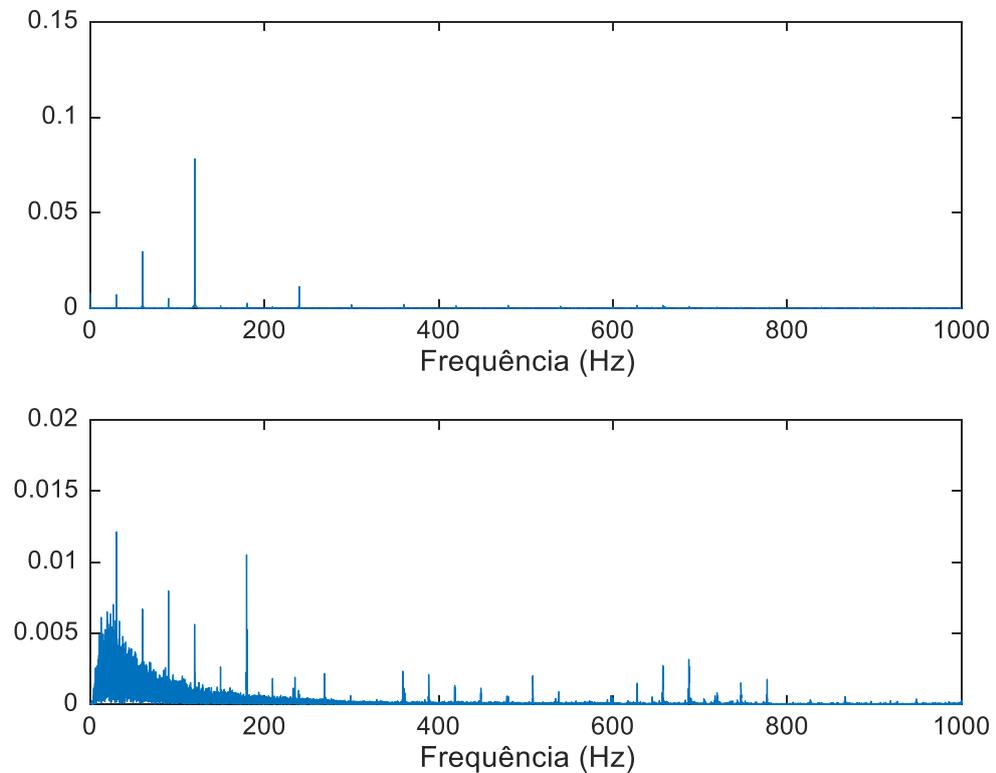


**Fonte: Autoria própria**

#### 4.2.2 Desequilíbrio elétrico

Para a primeira situação de desequilíbrio, o sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 39, o padrão visto anteriormente manteve-se, sendo que, em relação ao sinal de vibração da carga de 0,4N da situação de equilíbrio, a magnitude da componente de 120Hz aumentou e a de 60Hz diminuiu, enquanto que, em relação ao sinal equivalente do motor saudável, ocorreu o contrário e a magnitude da componente de 120Hz diminuiu e a de 60Hz aumentou. No sinal de áudio, o padrão visto na carga de 0,4N da situação de equilíbrio não manteve-se, sendo que a magnitude de 180Hz é a segunda maior do sinal e tanto ela quanto a de 60Hz possuem valores próximos ao visto na carga de 0,4N em situação de equilíbrio, as magnitudes das componentes de 30Hz, 90Hz e 120Hz foram maiores e a de 150Hz menor. O ruído característico do problema também é visto aqui e as magnitudes das componentes continuam inferiores ao sinal equivalente do motor saudável.

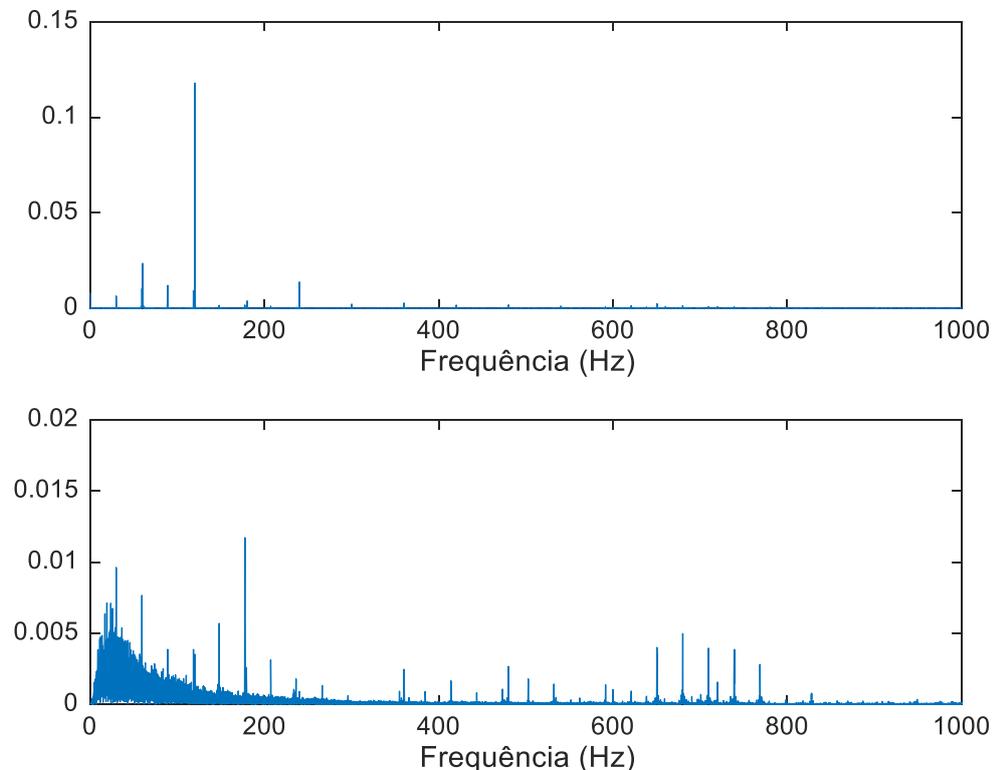
**Figura 39 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 1**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 40, no sinal de vibração é possível verificar a existência de componentes de magnitude baixa próximas às componentes de 60Hz e 120Hz. Comparando com o sinal da carga de 0,4N, vê-se que as magnitudes das componentes as componentes de 90Hz, 120Hz e 240Hz aumentaram enquanto a de 60Hz diminuiu. Em relação ao sinal equivalente em situação de equilíbrio, a magnitude da componente de 60Hz aumentou e as outras diminuíram. Já em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes das componentes de 30Hz e 60Hz aumentaram enquanto as outras diminuíram. O sinal de áudio a componente de 180Hz como a de maior magnitude, como já ocorreu anteriormente em outros sinais com o mesmo problema. Comparando com o sinal da carga de 0,4N, as magnitudes das componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz diminuíram enquanto as outras aumentaram. Em relação ao sinal equivalente na situação de equilíbrio, a magnitude das componentes de 30Hz e 60Hz aumentaram e as outras diminuíram.

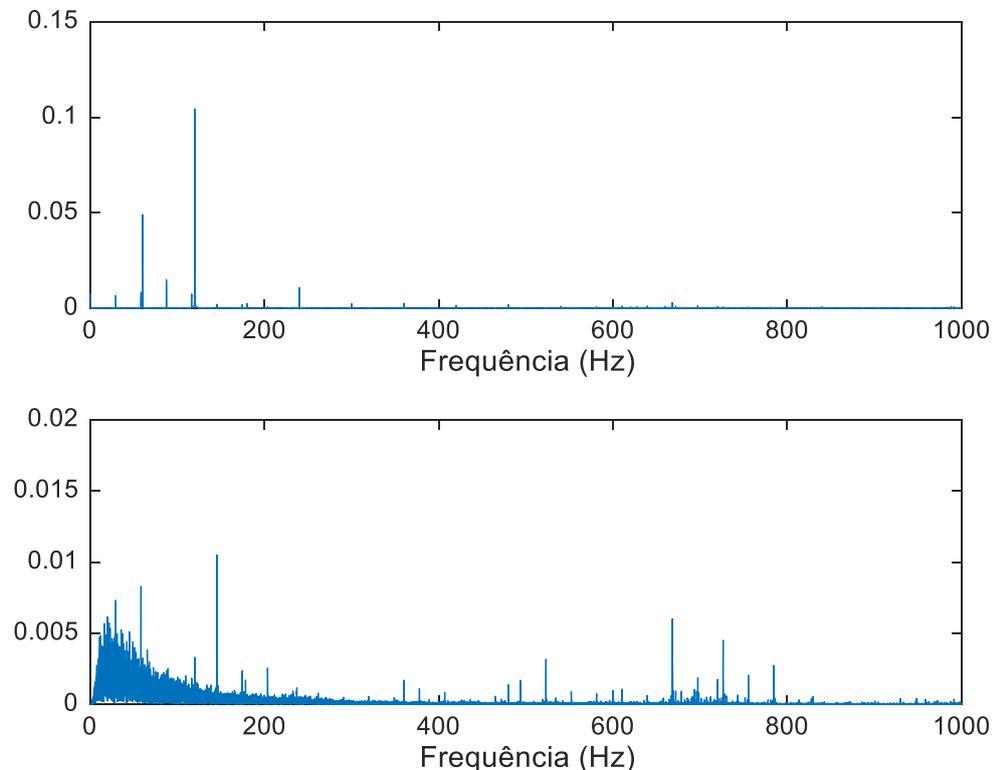
**Figura 40 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 1**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 41, as magnitudes das componentes de 60Hz e 90Hz aumentaram e a de 120Hz diminuiu em relação ao sinal da carga de 0,4N. Novamente é possível ver componentes de baixa magnitude perto das componentes de 60Hz e 120Hz. Em relação ao sinal equivalente na situação de equilíbrio, as magnitudes das componentes de 60Hz e 90Hz diminuiram enquanto as outras aumentaram. Já em comparação com o sinal equivalente do motor saudável as magnitudes das componentes de 30Hz, 120Hz e 240Hz aumentaram enquanto as outras diminuiram. No sinal de áudio a magnitude da componente de 180Hz diminuiu significativamente em relação ao sinal da carga de 2N, e, desta vez, a componente de maior magnitude é a de 150Hz. A magnitude da componente de 60Hz aumentou enquanto as outras, com exceção da de 150Hz, diminuiram. Em relação ao sinal equivalente da situação de equilíbrio, as magnitudes das componentes de 30Hz e 60Hz são maiores e a de 150Hz ligeiramente menor, sendo que aqui a de 150Hz é a maior e lá ela é a segunda maior. O ruído característico, novamente, é observável. Em relação ao sinal saudável, as componentes possuem magnitudes muito menores.

**Figura 41 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 1**



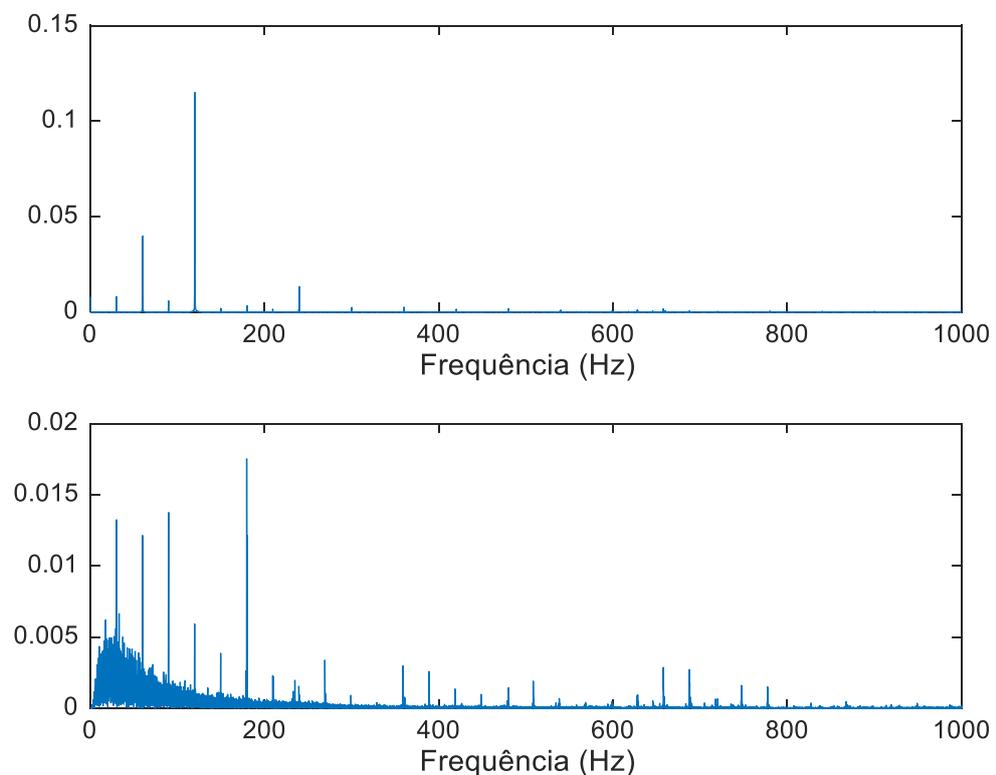
**Fonte: Autoria própria**

Para a segunda situação de desequilíbrio, o sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 42, comporta-se da mesma forma já vista, porém, em relação aos sinais da situação de equilíbrio e primeira situação de desequilíbrio, as magnitudes foram maiores. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes das componentes de 60Hz e 240Hz aumentaram, a de 120Hz manteve-se a um valor próximo e as outras diminuíram. No sinal de áudio, as magnitudes foram maiores em relação aos sinais da situação de equilíbrio e primeira situação de desequilíbrio. A componente de 180Hz, novamente, foi a de maior magnitude, seguida pelas componentes de 90Hz, 30Hz e 60Hz, diferente do que foi visto nos outros dois sinais mencionados. O ruído característico é visível e as magnitudes são inferiores às vistas no sinal equivalente do motor saudável.

Para a carga de 2N, Figura 43, é possível notar no sinal de vibração componentes de baixa magnitude próximas às componentes de 60Hz e 120Hz. Em relação ao sinal da carga de 0,4N e ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, a magnitude da componente de 60Hz aumentou enquanto as de 120Hz e 240Hz

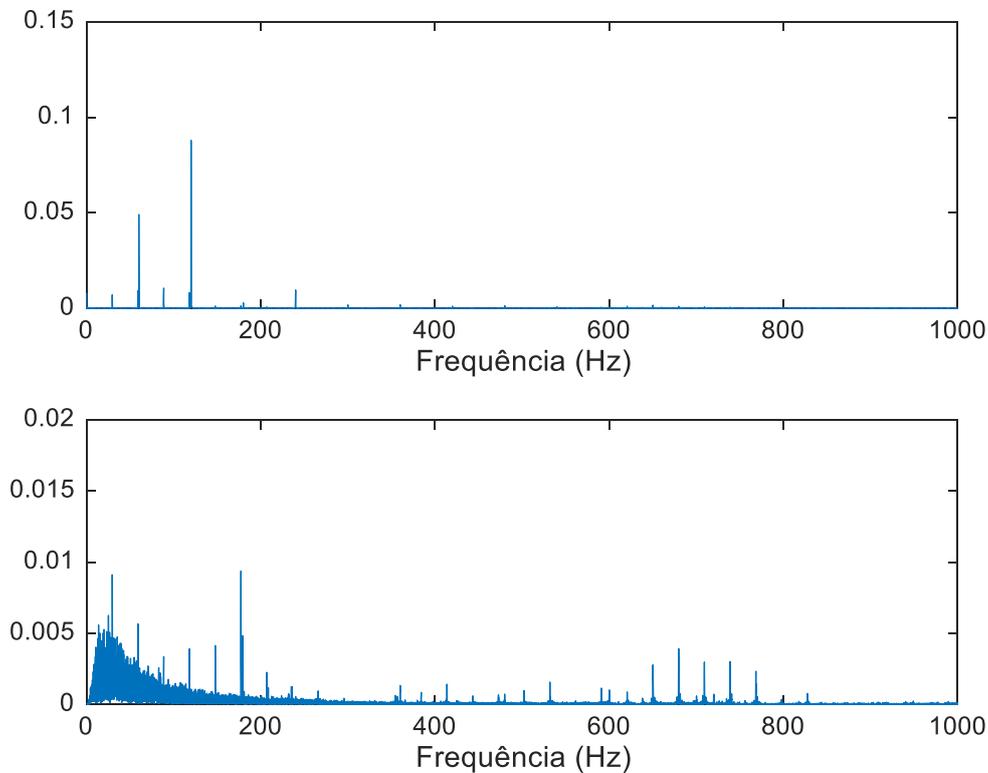
diminuíram. Comparando com o sinal da situação de equilíbrio, a magnitude da componente de 240Hz aumentou enquanto as outras diminuíram. E, comparando com o sinal equivalente do motor saudável, vê-se que a magnitude da componente de 30Hz diminuiu, a de 120Hz manteve-se a um valor próximo e as outras diminuíram. No sinal de áudio as magnitudes diminuíram em relação aos sinais da carga de 0,4N e ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, porém, a magnitude da componente de 180Hz continua sendo a maior. É possível notar uma componente próxima à componente de 180Hz com cerca da metade da magnitude da componente de 180Hz. Comparado com o sinal da situação de equilíbrio, as magnitudes das componentes de 90Hz, 120Hz e 150Hz diminuíram enquanto as outras aumentaram. O ruído característico é visível e as magnitudes são inferiores às vistas no sinal equivalente do motor saudável.

**Figura 42 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 2**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 43 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 2**

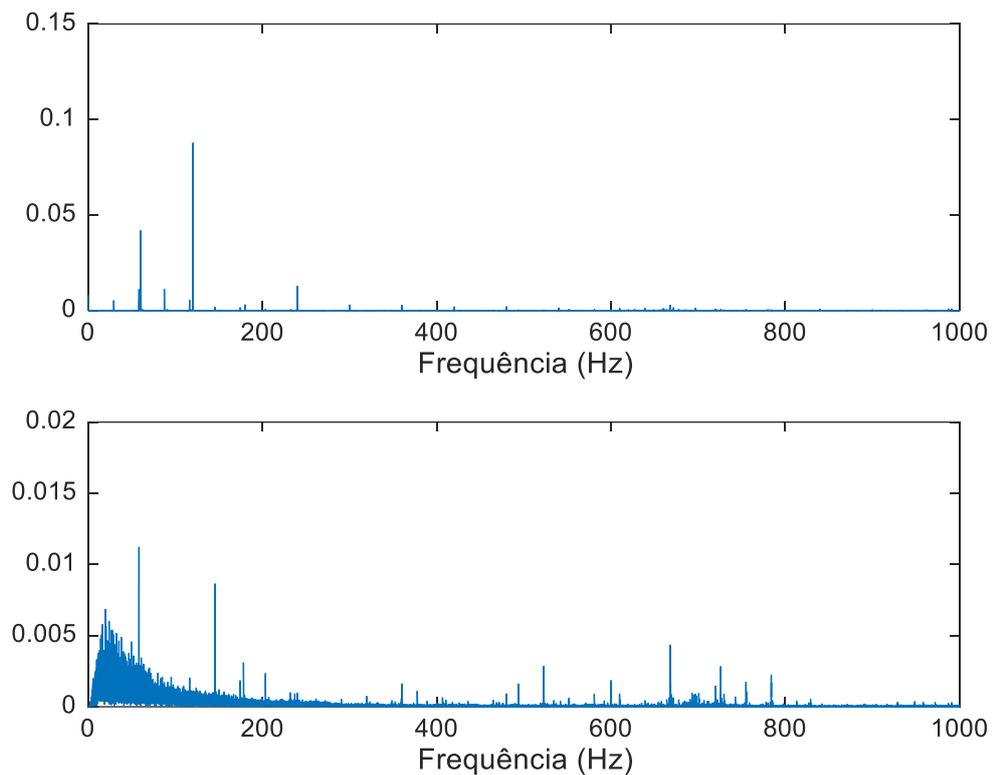


**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 44, ainda é possível ver no sinal de vibração as componentes de baixa magnitude próximas às componentes de 60Hz e 120Hz. Em relação ao sinal da carga de 2N, a magnitude da componente de 240Hz aumentou, a de 120Hz manteve-se a um valor próximo e as outras diminuíram. Comparando com o sinal da primeira situação de desequilíbrio, a magnitude da componente de 240Hz aumentou enquanto as outras diminuíram. Em relação ao sinal em situação de equilíbrio, a magnitude da componente de 60Hz diminuiu enquanto as outras aumentaram. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, a magnitude da componente de 30Hz foi menor enquanto as outras foram maiores. O sinal de áudio possui apenas duas componentes de destaque, a de 150Hz e a de 60Hz. Em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, a componente de 60Hz foi maior e a de 150Hz foi menor, sendo que, neste caso, a maior magnitude é a de 60Hz, enquanto no outro é a de 150Hz. Em relação ao sinal da situação de equilíbrio, as magnitudes foram maiores, mas manteve-se o mesmo padrão, com a componente de 60Hz tendo

a maior magnitude. O ruído característico ainda está presente e as magnitudes são bem menores se comparadas ao sinal equivalente do motor saudável.

**Figura 44 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 2**

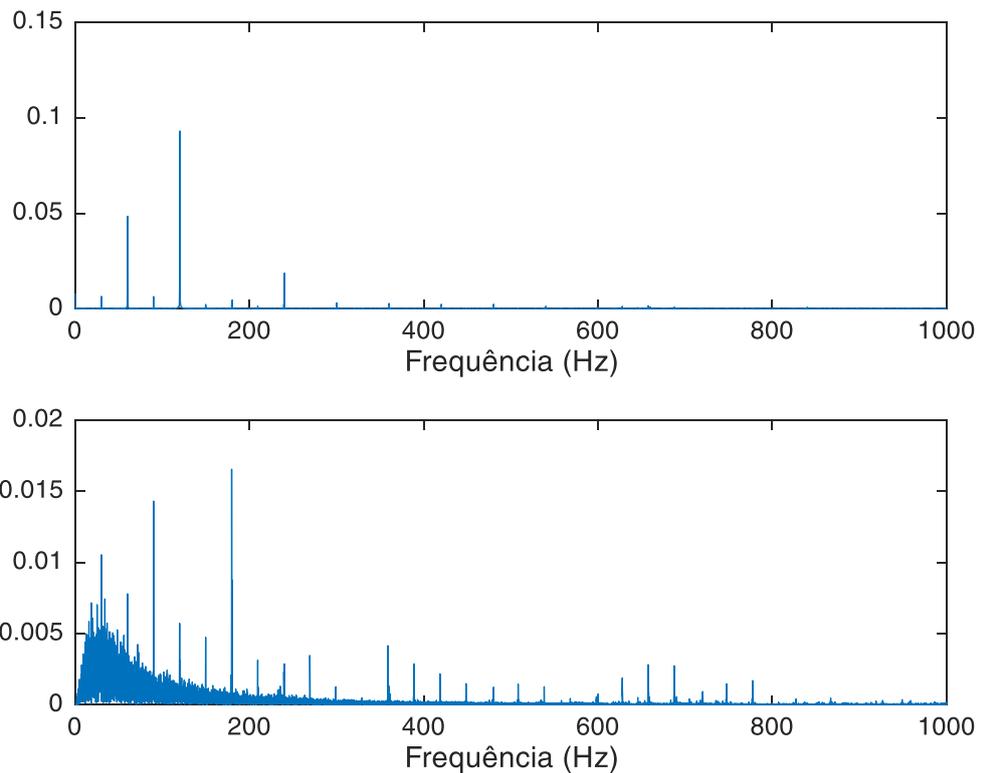


**Fonte: Autoria própria**

Para a terceira situação de desequilíbrio, o sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 45, manteve o mesmo padrão já visto, sendo que a magnitude da componente de 30Hz foi menor do que nos sinais das primeira e segunda situações de desequilíbrio, da situação de equilíbrio e do sinal equivalente do motor saudável. Já as componentes de 60Hz e 120Hz tiveram maior magnitude em relação a todos os sinais já mencionados. A componente de 90Hz teve praticamente a mesma magnitude em todos eles. A componente de 120Hz teve magnitude menor do que o sinal da segunda situação de desequilíbrio e maior em relação aos outros sinais. O sinal de áudio tem como componente de maior magnitude a de 180Hz, seguida pelas componentes de 90Hz, 30Hz, 60Hz e 120Hz. Comparando com o sinal da situação de equilíbrio, nota-se que as magnitudes são maiores. Em relação à primeira situação de desequilíbrio, apenas a componente de 30Hz teve maior magnitude. Em relação à

segunda situação de desequilíbrio, as magnitudes das componentes de 30Hz, 60Hz e 120Hz foram maiores enquanto as outras foram menores. Novamente, as magnitudes em relação ao sinal do moto saudável foram inferiores e o ruído característico continua presente.

**Figura 45 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 3**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 46, no sinal de vibração é possível observar a presença de componentes de baixa magnitude próximas às componentes de 60Hz e 120Hz. Comparando com o sinal da carga de 0,4N, as componentes de 120Hz e 240Hz diminuíram enquanto as outras aumentaram. Em relação ao sinal da segunda situação de desequilíbrio, com exceção da componente de 240Hz, que foi maior, as outras mantiveram praticamente o mesmo valor. Comparando com o sinal da primeira situação de equilíbrio, a magnitude da componente de 60Hz foi maior enquanto a de 120Hz foi menor, sendo que as outras mantiveram praticamente o mesmo valor. Em relação ao sinal da situação de equilíbrio, vê-se que apenas a magnitude da componente de 120Hz foi menor enquanto as outras foram maiores. Comparando com

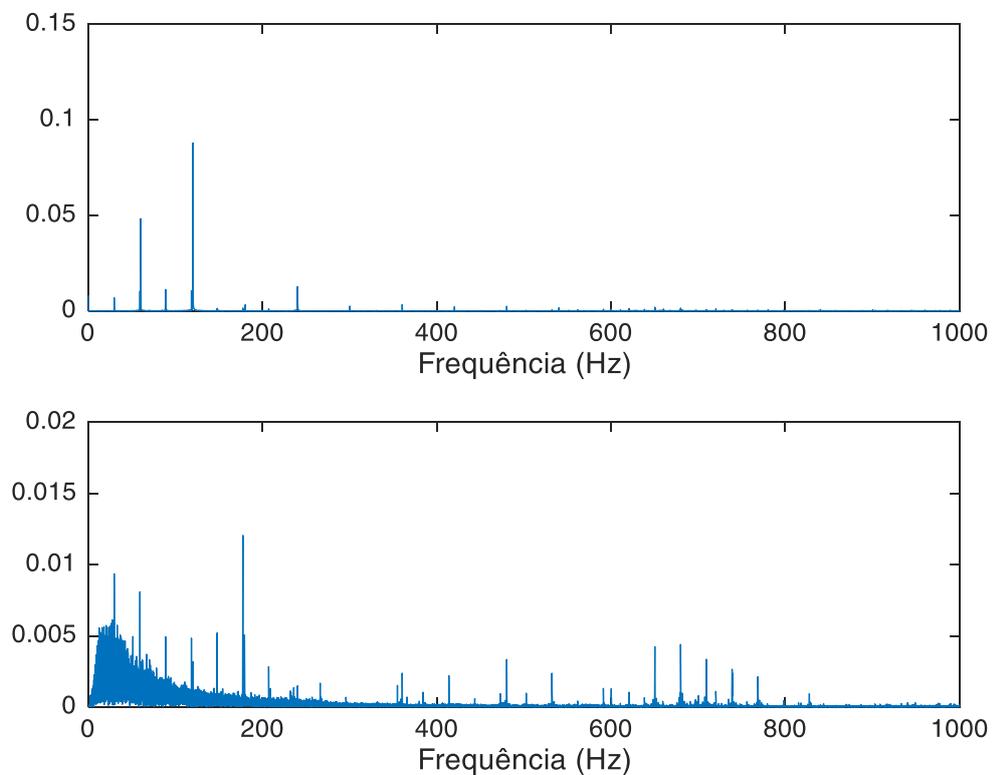
o sinal equivalente do motor saudável, apenas a componente de 30Hz foi menor, enquanto as outras foram maiores. No sinal de áudio a maior magnitude foi a de 180Hz, e as magnitudes das componentes de 30Hz, 90Hz, 120Hz e 180Hz foram menores, enquanto as outras foram maiores em relação ao sinal da carga de 0,4N. Em relação à segunda situação de desequilíbrio, todas as magnitudes foram maiores. Em relação à primeira situação de desequilíbrio, a componente de 30Hz foi maior enquanto as outras foram menores. Comparando com o sinal da situação de equilíbrio, as magnitudes das componentes de 30Hz e 60Hz foram maiores enquanto as outras foram menores. O ruído característico continua presente e todas as magnitudes são inferiores em relação ao sinal equivalente do motor saudável.

Para a carga de 4N, Figura 47, ainda é possível observar as componentes de baixa magnitude ao lado das componentes de 60Hz e 120Hz. As magnitudes do sinal foram menores do que nos sinais da carga de 2N e das duas situações de equilíbrio. Em relação ao sinal em situação de equilíbrio, a magnitude da componente de 60Hz foi maior e as outras foram menores. Comparando ao sinal equivalente do motor saudável, as componentes de 60Hz e 90Hz foram maiores enquanto as outras foram menores. O sinal de áudio não possui nenhum dos padrões vistos anteriormente, sendo que a componente de maior magnitude é a de 60Hz, seguida pelas componentes de 30Hz e 150Hz. O ruído característico é visível, mas bem menor em relação aos outros sinais. As componentes de 30Hz e 60Hz foram maiores do que nos sinais das situações de equilíbrio e desequilíbrio. A componente de 180Hz foi menor do que nos casos já mencionados. A componente de 150Hz foi menor do que nos sinais das situações de equilíbrio e desequilíbrio, mas foi maior em relação ao sinal da carga de 2N. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes foram todas inferiores.

Para a quarta situação de desequilíbrio, a carga de 0,4N, Figura 48, as componentes de 60Hz e 120Hz tiveram maior magnitude do que nos sinais das situações de desequilíbrio, da situação de equilíbrio e do sinal equivalente do motor saudável. A componente de 240Hz só foi menor do que no sinal da terceira situação de desequilíbrio e foi maior em relação aos outros sinais já mencionados. A componente de 30Hz teve praticamente a mesma magnitude em relação ao sinal da terceira situação de desequilíbrio e foi menor em relação aos outros. No sinal de áudio a magnitude da componente de 180Hz foi a maior, sendo seguida pelas componentes de 90Hz, 30Hz, 60Hz e 120Hz. As magnitudes das componentes de 90Hz e 180Hz foi

maior em relação aos sinais nas situações de equilíbrio e desequilíbrio. A componente de 30Hz foi maior em relação ao sinal da situação de equilíbrio e menor em relação aos outros. A componente de 60Hz foi maior em relação aos sinais da primeira situação de desequilíbrio e situação de equilíbrio. A componente de 120Hz foi menor em relação aos outros sinais. O ruído característico ainda está presente e as magnitudes foram inferiores se comparadas ao sinal equivalente do motor saudável.

**Figura 46 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 3**

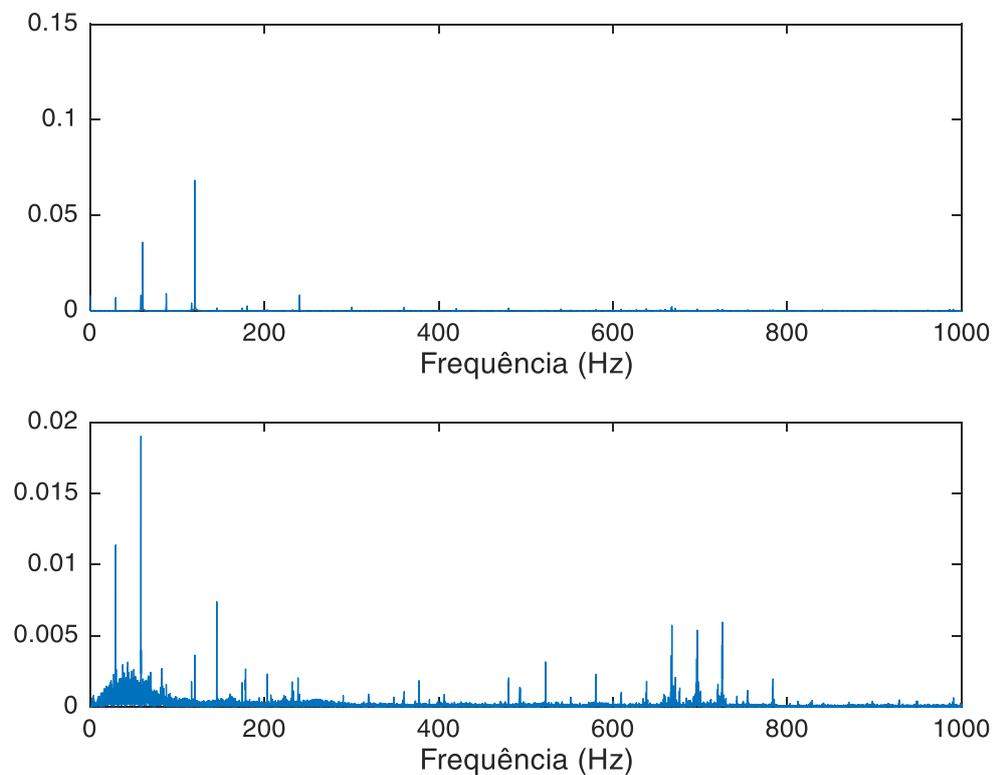


**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 49, as magnitudes das componentes de 60Hz e 120Hz do sinal de vibração foram menores em relação ao sinal da carga de 0,4N. A componente de 60Hz foi maior em relação aos sinais da primeira situação de desequilíbrio, da situação de equilíbrio e do sinal equivalente do motor saudável. A componente de 120Hz foi menor em relação aos sinais das situações de desequilíbrio, equilíbrio e equivalente do motor saudável. As magnitudes das componentes de 90Hz e 240Hz foram maiores em relação aos outros sinais. A componente de 30Hz teve magnitude menor em relação ao sinal equivalente do motor saudável e menor em

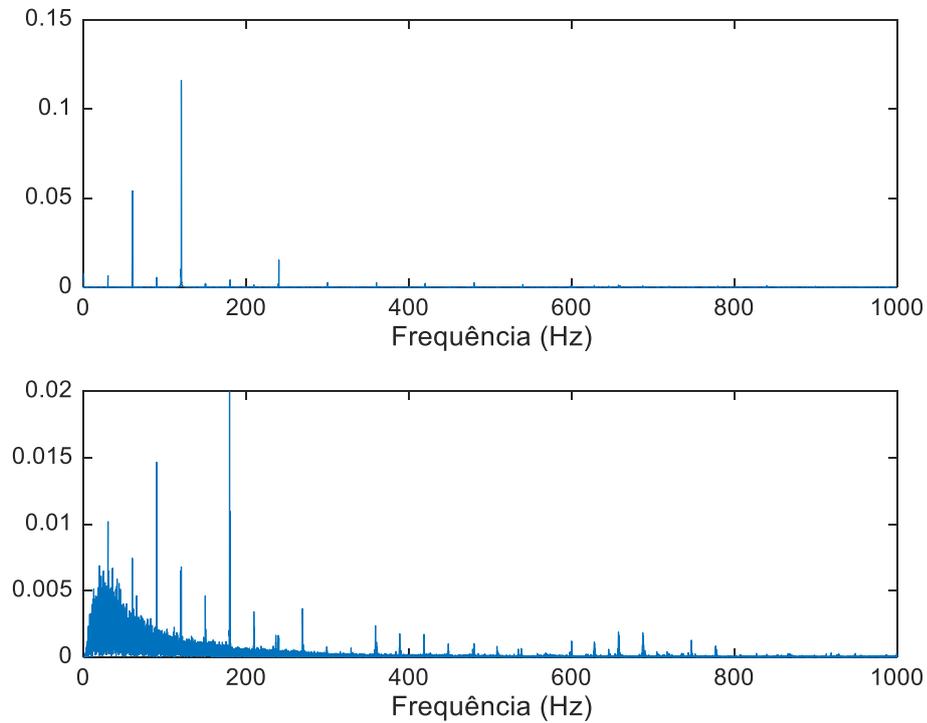
relação aos outros. No sinal de áudio a componente de 180Hz foi a de maior magnitude, seguida pelas componentes de 30Hz, 60Hz, 120Hz e 150Hz. A componente de 150Hz foi menor em relação aos sinais das primeira e terceira situações de desequilíbrio e foi maior em relação à segunda situação de desequilíbrio e à situação de equilíbrio. As outras componentes foram maiores em relação aos sinais em situação de desequilíbrio e equilíbrio. Novamente, o ruído característico é visível e as magnitudes são inferiores se comparadas ao sinal equivalente do motor saudável.

**Figura 47 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 3**



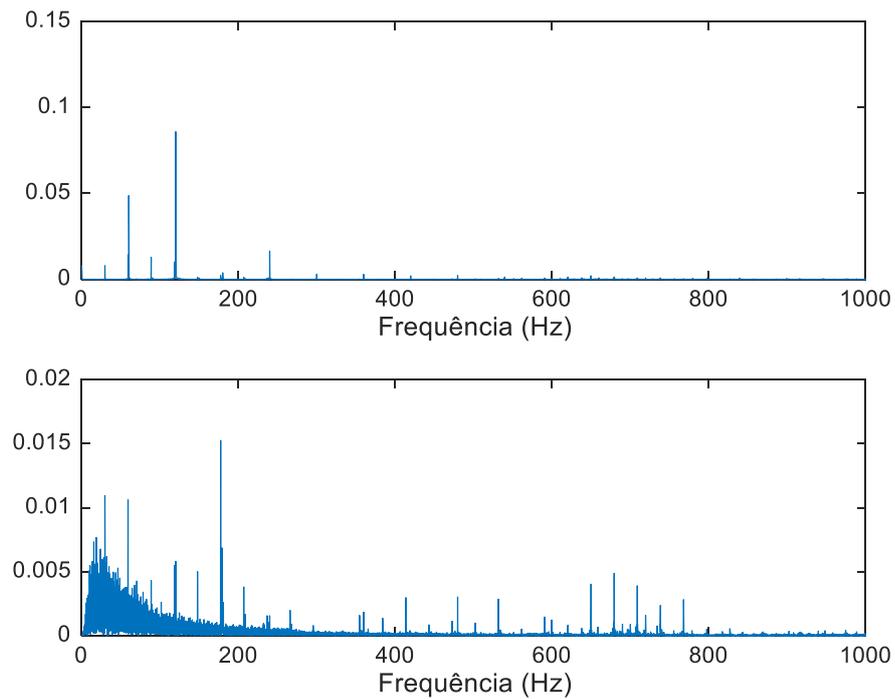
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 48 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 4**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 49 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio 4**



**Fonte: Autoria própria**

## 4.3 Falhas no rolamento

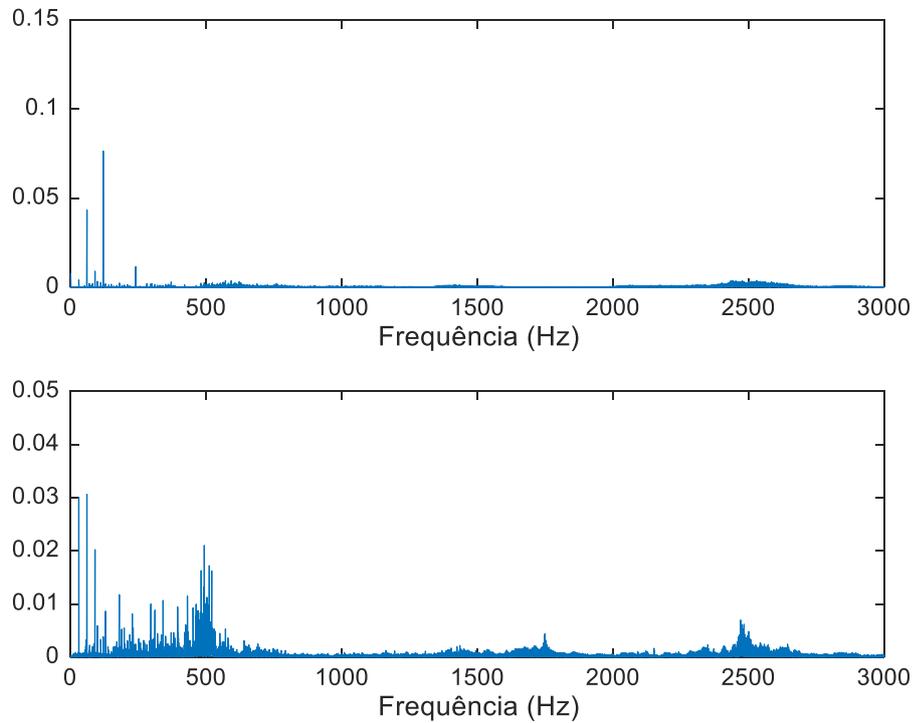
A seguir será feita a análise para os casos em que há falhas no rolamento do motor.

### 4.3.1 Equilíbrio elétrico

Para a carga de 0,4N, Figura 50, o sinal de vibração possui a componente de 120Hz como a de maior magnitude, seguida pelas componentes de 60Hz, 240Hz e 90Hz. Diferente dos outros casos, aqui é possível ver um ruído de baixa magnitude em alguns intervalos de frequências, sendo que fica mais intenso em torno de 2500Hz. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 30Hz teve magnitude menor enquanto as outras tiveram magnitude maior. No sinal de áudio a maior componente é a de 60Hz, seguida pelas componentes de 30Hz e 90Hz, também é possível observar um ruído mais intenso entre as frequências de 400Hz e 600Hz e, assim como no sinal de vibração, há um ruído em torno da componente de 2500Hz. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 30Hz teve magnitude menor enquanto as de 60Hz e 90Hz foram maiores, sendo que os ruídos presentes neste sinal não estão presentes lá.

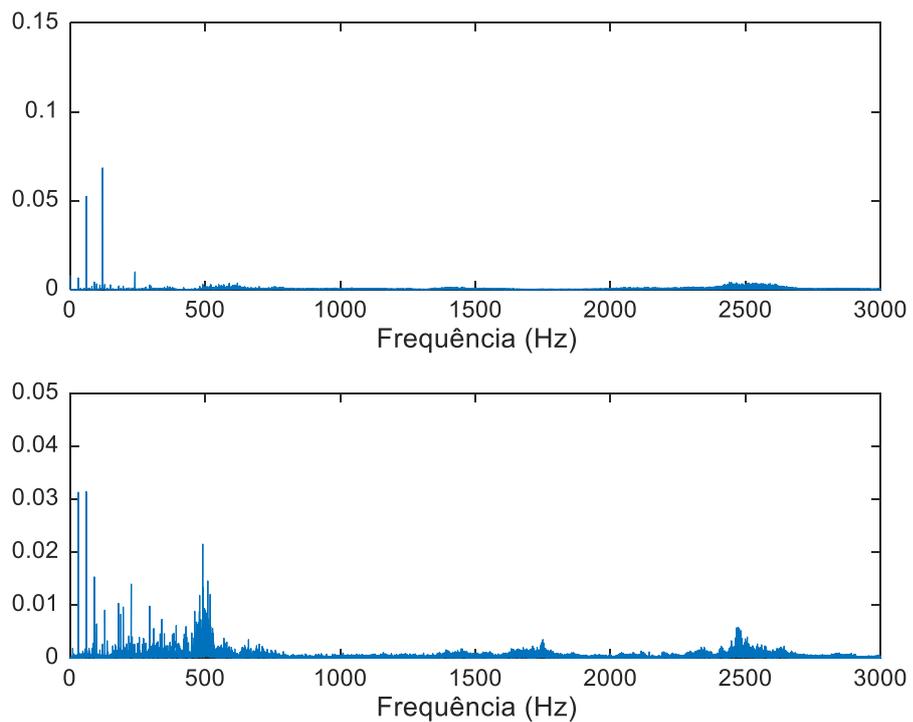
Para a carga de 1N, Figura 50, a magnitude da componente de 60Hz do sinal de vibração diminuiu enquanto as outras aumentaram em relação ao sinal da carga de 0,4N. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 60Hz diminuiu enquanto as outras aumentaram. Os ruídos já descritos anteriormente também estão presentes nesse sinal. O sinal de áudio comporta-se da mesma forma que o sinal da carga de 0,4N, sendo que as magnitudes das componentes de 30Hz e 60Hz aumentaram e a de 90Hz diminuiu. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as componentes de 30Hz e 90Hz tiveram menor intensidade e a de 60Hz teve maior. Os ruídos já mencionados também estão presentes neste sinal.

**Figura 50 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 51 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 1N do motor com problema de rolamento em equilíbrio**



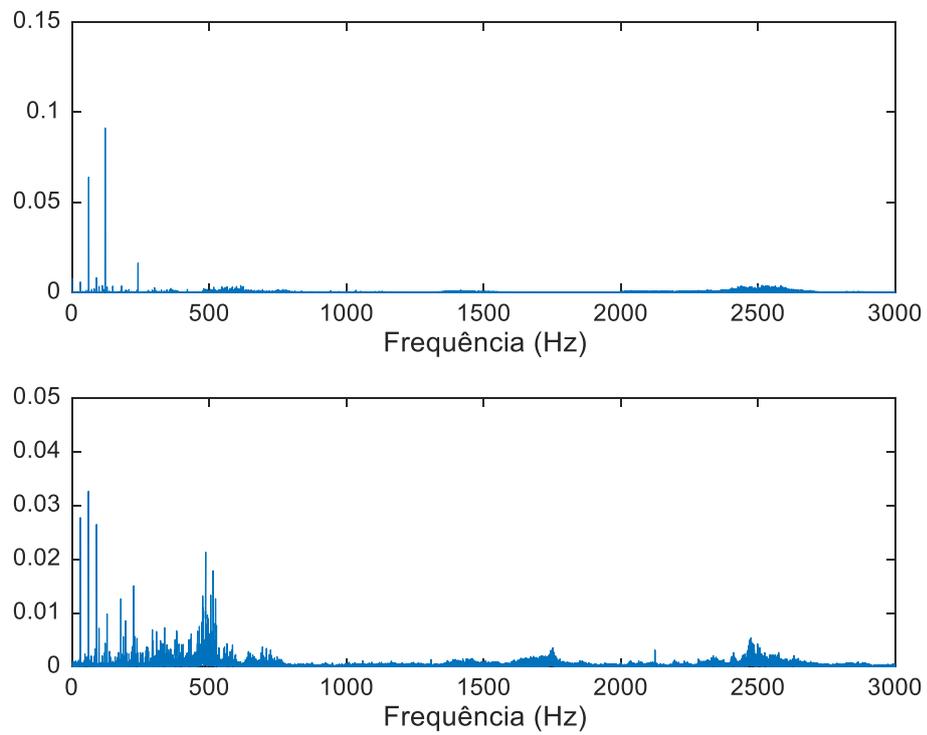
**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 52, as componentes do sinal de vibração tiveram maior magnitude em relação ao sinal da carga de 1N, com exceção da componente de 30Hz, que diminuiu. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as componentes do sinal tiveram menor magnitude, com exceção da componente de 30Hz, que aumentou. Os ruídos continuam presentes. No sinal de áudio, as magnitudes das componentes foram maiores em relação ao sinal da carga de 1N, com exceção da componente de 30Hz, que foi menor. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as componentes do sinal tiveram menor magnitude, com exceção da componente de 30Hz, que foi maior. Os ruídos continuam presentes no sinal.

Para a carga de 3N, Figura 53, é possível ver no sinal de áudio uma componente bem próxima à componente de 60Hz. Em relação ao sinal da carga de 2N, as magnitudes das componentes de 120Hz e 240Hz aumentaram enquanto a de 60Hz diminuiu. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes das componentes de 30Hz e de 120Hz foi menor enquanto as outras foram maiores. No sinal de áudio as componentes de 30Hz e 90Hz foram menores em relação ao sinal da carga de 2N, enquanto as outras foram maiores. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 30Hz teve maior magnitude enquanto as outras tiveram menor. Tanto no sinal de vibração quanto no sinal de áudio os ruídos continuam presentes.

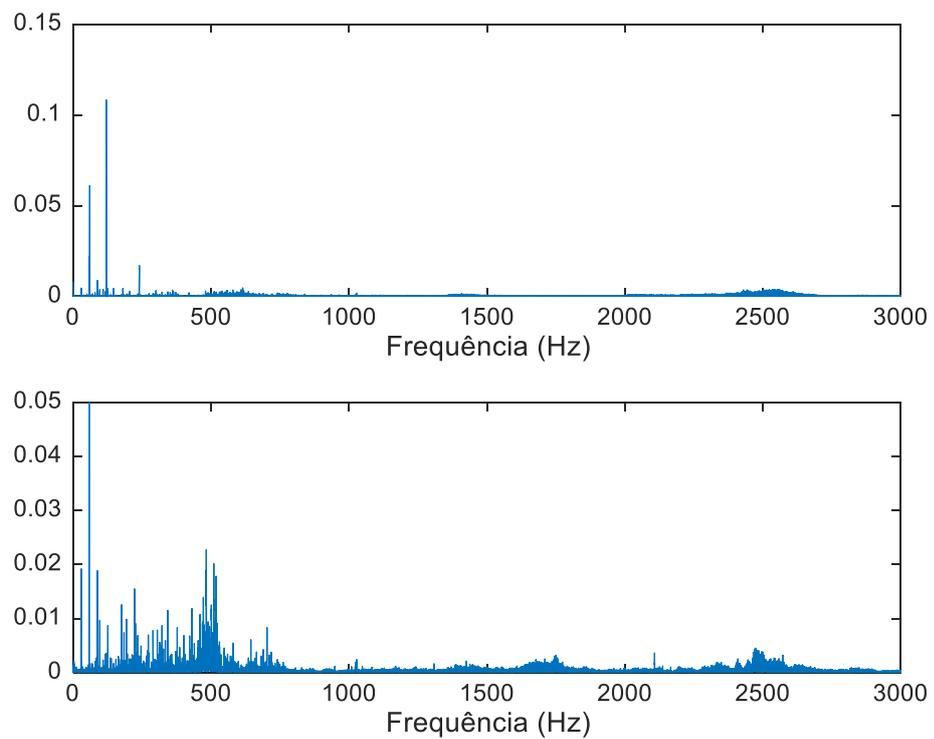
Para a carga de 4N, Figura 54, as magnitudes das componentes do sinal de vibração foram menores em relação ao sinal da carga de 3N, com exceção da componente de 30Hz, que teve maior magnitude. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 60Hz teve maior magnitude enquanto as outras tiveram menor. Os ruídos continuam presentes no sinal. No sinal de áudio as magnitudes tiveram menor magnitude em relação ao sinal da carga de 3N, com exceção da componente de 30Hz, que teve maior magnitude. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 60Hz teve maior magnitude enquanto as outras tiveram menor. Os ruídos, novamente, estão presentes no sinal.

**Figura 52 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em equilíbrio**



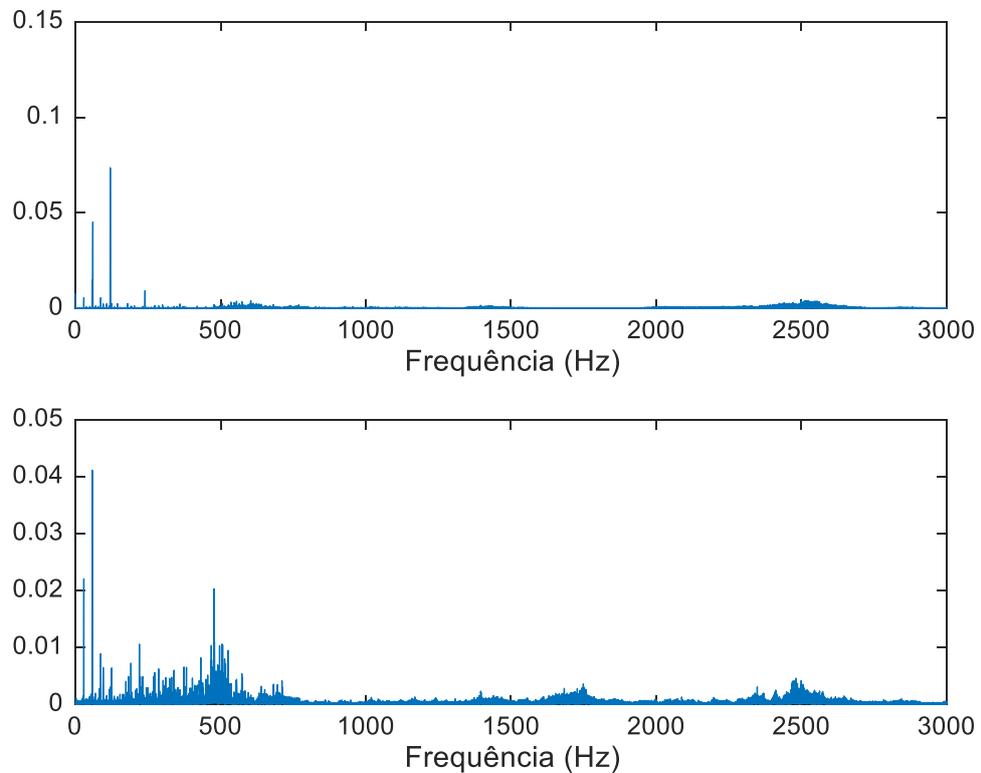
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 53 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 3N do motor com problema de rolamento em equilíbrio**



**Fonte: Autoria própria**

**Figura 54 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em equilíbrio**

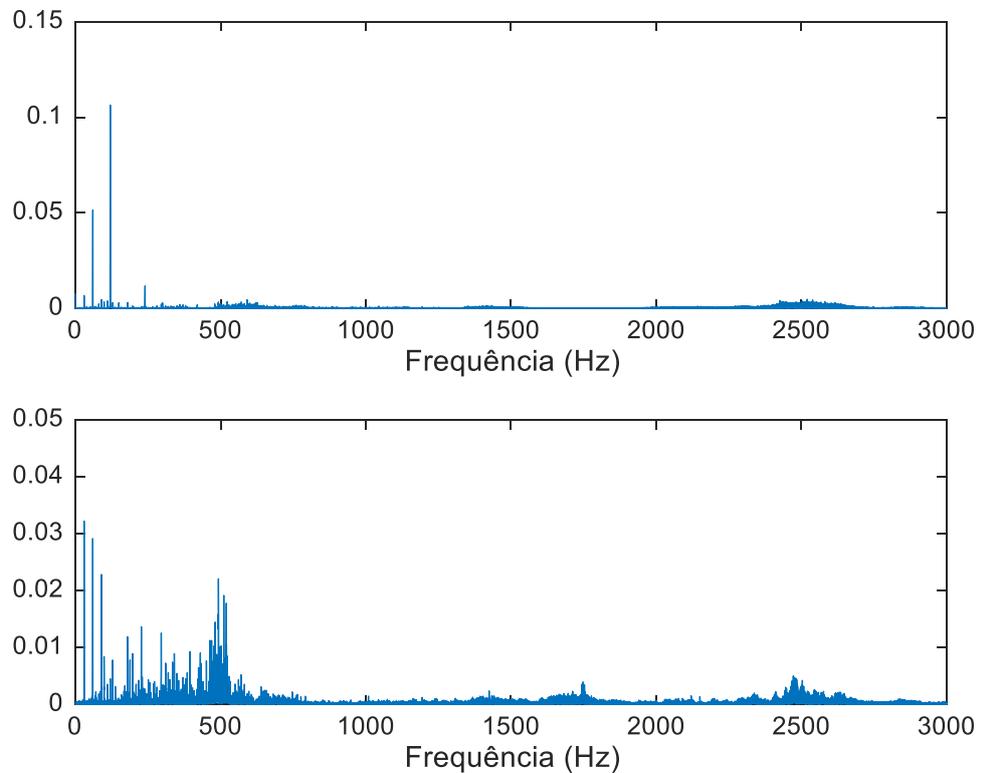


**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3.2 Desequilíbrio elétrico

Para a primeira situação de desequilíbrio, o sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 55, teve componentes com maiores magnitudes em relação ao sinal na condição de equilíbrio. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes das componentes de 30Hz, 90Hz e 240Hz foram menores enquanto as outras foram maiores. Os ruídos característicos do problema ainda estão presentes. No sinal de áudio as componentes de 30Hz e 90Hz tiveram menor magnitude enquanto a de 60Hz teve maior em relação ao sinal em situação de equilíbrio. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a magnitude da componente de 30Hz foi menor enquanto as outras foram maiores. Assim como no sinal de vibração, os ruídos característicos da falha estão presentes no sinal de áudio também.

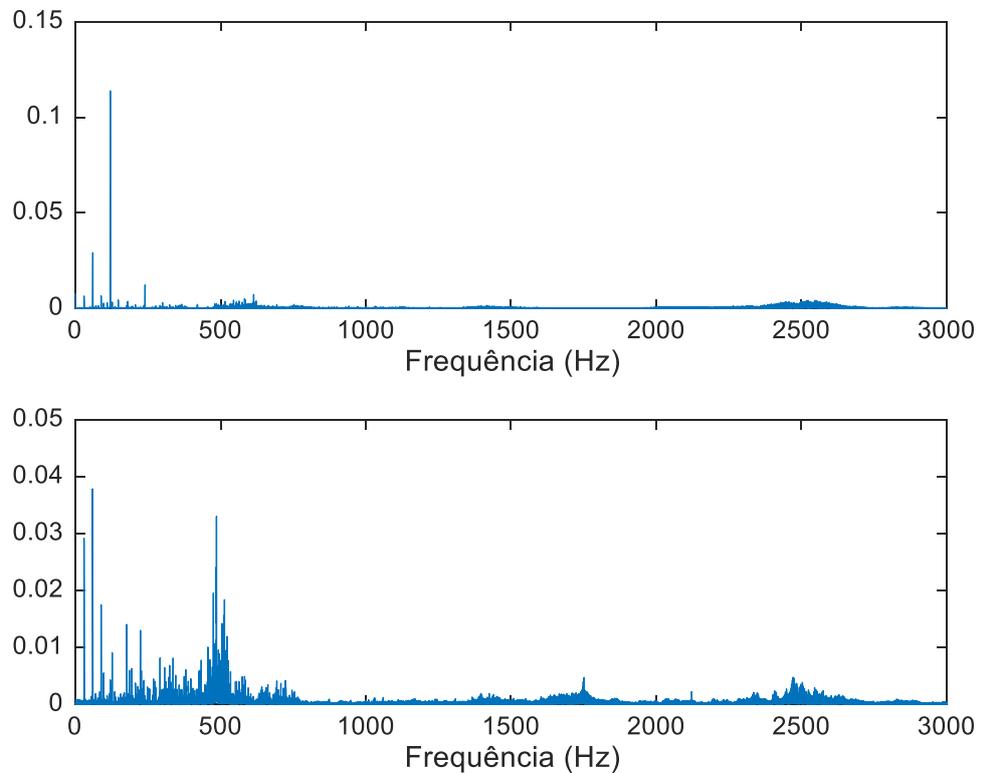
**Figura 55 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 1**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 56, a componente de 120Hz do sinal de vibração teve maior intensidade em relação ao sinal da carga de 0,4N, enquanto a componente de 60Hz teve menor intensidade. É possível ver muito próxima da componente de 60Hz uma componente com cerca da metade da magnitude. Em relação ao sinal da situação de equilíbrio, a componente de 60Hz teve menor intensidade enquanto as outras tiveram maior. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, com exceção da componente de 30Hz, as componentes tiveram maior magnitude. No sinal de áudio a componente de maior magnitude foi a de 60Hz, que também foi maior em relação ao sinal da carga de 0,4N, enquanto as outras foram menores. É possível ver que o ruído é mais intenso nesse sinal em relação aos outros, tendo, inclusive, uma componente com a segunda maior magnitude do sinal. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as magnitudes das componentes de 30Hz e 120Hz foram menores enquanto as outras foram maiores. Tanto no sinal de vibração quanto no sinal de áudio é possível ver o ruído característico da falha.

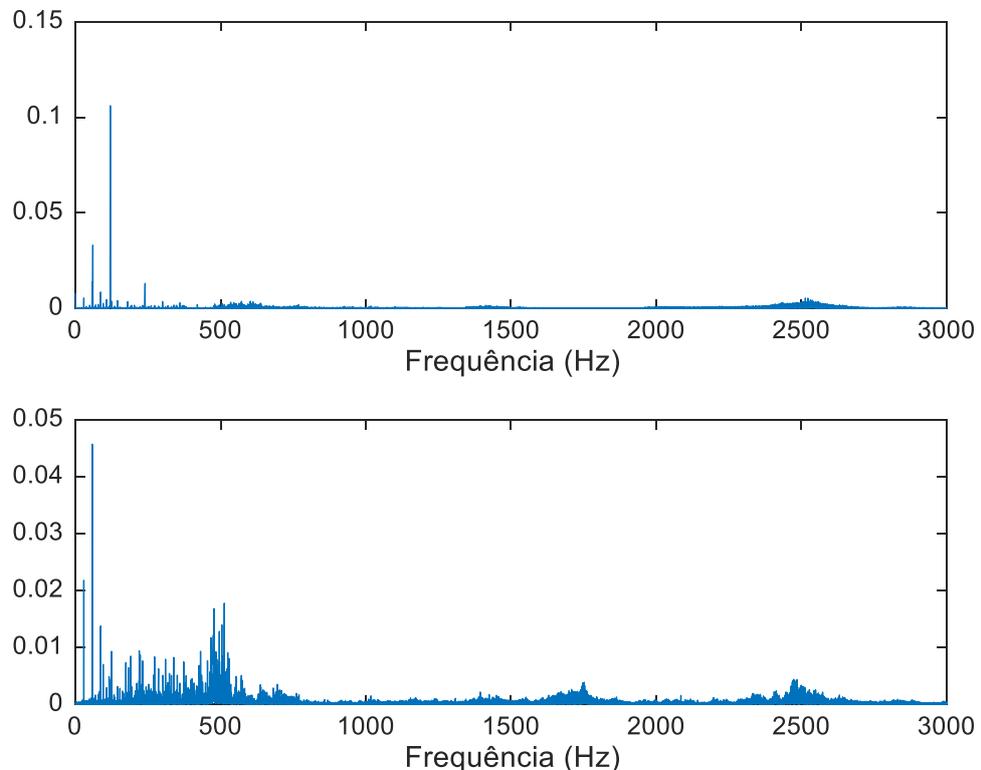
**Figura 56 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 1**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 57, no sinal de vibração a componente de 60Hz teve maior magnitude e as outras tiveram menor em relação ao sinal da carga de 2N. Em relação ao sinal em situação de equilíbrio, a componente de 60Hz teve menor magnitude enquanto as outras tiveram maior. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, todas as magnitudes foram menores. No sinal de áudio a componente de 60Hz teve maior magnitude enquanto os outros tiveram menor em relação ao sinal da carga de 2N. Comparando-o com o sinal em situação de equilíbrio, a componente de 30Hz foi ligeiramente mais intensa enquanto as outras foram menores. Comparando com o sinal equivalente do motor saudável, a componente de 30Hz teve maior intensidade enquanto as outras tiveram menor. Novamente, os ruídos característicos do problema estão presentes em ambos os sinais.

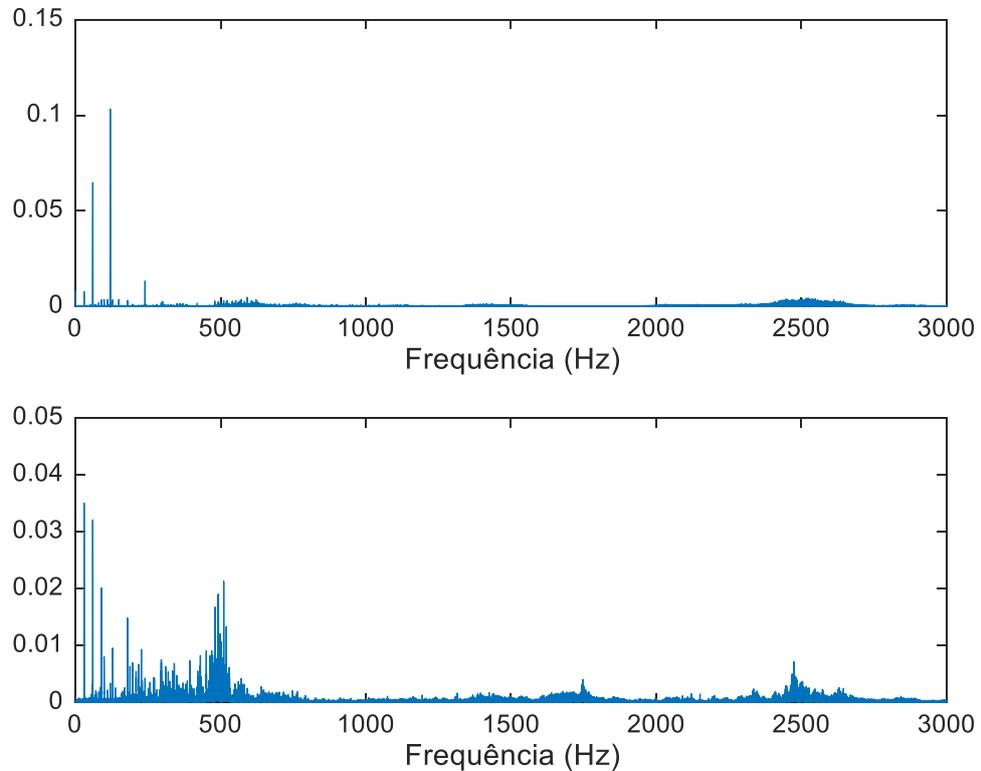
**Figura 57 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 1**



**Fonte: Autoria própria**

Para a segunda situação de desequilíbrio, no sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 58, vê-se que a magnitude da componente de 120Hz foi menor e as outras foram maiores em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio. Em relação ao sinal na situação de equilíbrio, apenas a componente de 90Hz teve maior magnitude enquanto as outras tiveram menor. Comparando com o sinal equivalente do motor saudável, as componentes de 60Hz e 240Hz tiveram menor magnitude e as outras tiveram maior. No sinal de áudio a componente de 90Hz teve maior magnitude e as outras tiveram menor em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio. Em relação ao sinal da situação de equilíbrio, as componentes tiveram magnitude ligeiramente menor. Comparando-o com o sinal equivalente do motor saudável, as componentes de 30Hz e 120Hz foram menores enquanto as outras foram maiores. Em ambos os sinais há os ruídos característicos do problema.

**Figura 58 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 2**

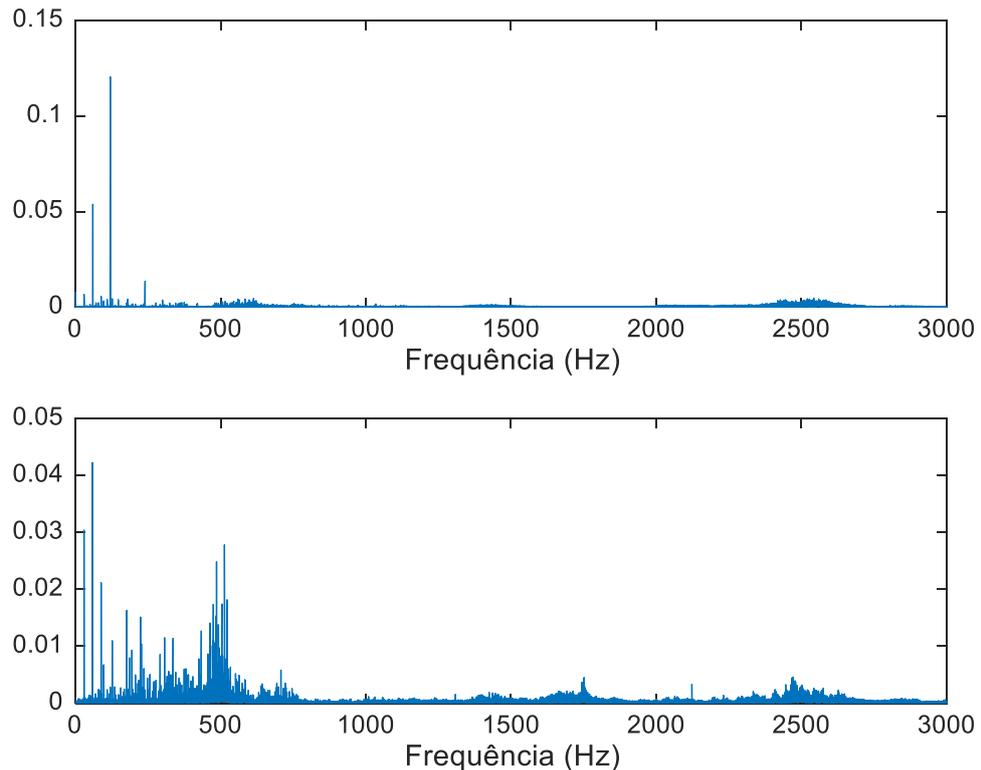


**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 59, é possível notar no sinal de vibração uma componente muito próxima à componente de 60Hz. As magnitudes das componentes de 30Hz e 120Hz do sinal de vibração foram maiores em relação ao sinal da carga de 0,4N e as outras foram maiores. Em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, todas as componentes foram menores. Comparando com o sinal em situação de equilíbrio, a componente de 120Hz foi maior enquanto as outras foram menores. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 30Hz teve maior magnitude enquanto as outras tiveram menor. No sinal de áudio é possível ver que o ruído é mais intenso em relação ao sinal da carga de 0,4N e as componentes, com exceção da de 30Hz, tiveram maior intensidade. Em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, as componentes tiveram menor intensidade. Comparando com o sinal em situação de equilíbrio, a componente de 90Hz foi mais intensa enquanto as outras foram menos. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 90Hz teve maior intensidade

enquanto as outras tiveram menor. Em ambos os sinais os ruídos continuam presentes.

**Figura 59 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 2**



**Fonte: Autoria própria**

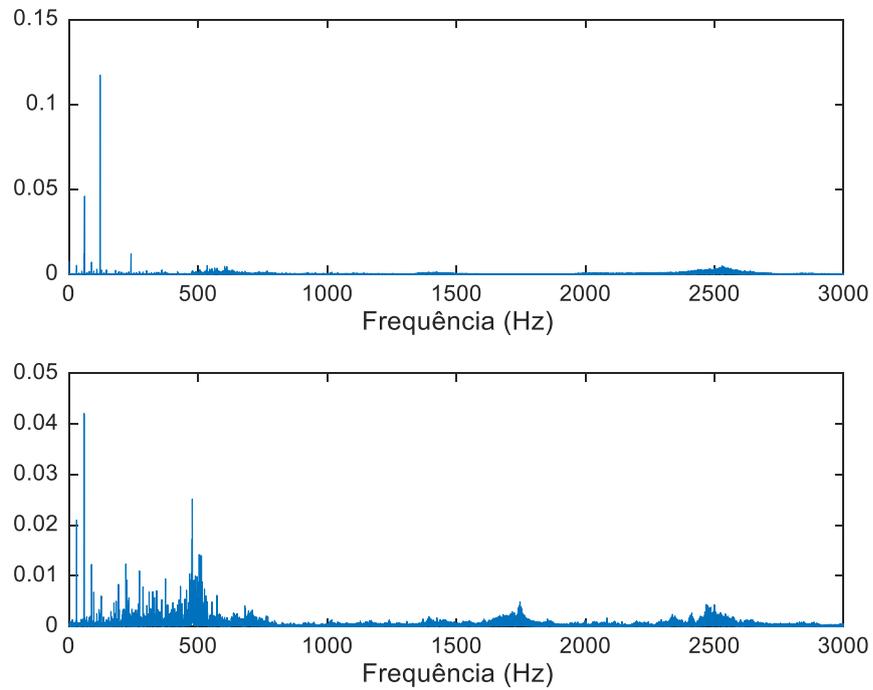
Para a carga de 4N, Figura 60, as componentes do sinal de vibração tiveram maior intensidade em relação aos sinais da carga de 2N, da primeira situação de desequilíbrio e da situação de equilíbrio. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, a componente de 30Hz teve menor intensidade enquanto as outras tiveram maior. No sinal de áudio, a componente de 60Hz manteve praticamente a mesma magnitude e as outras diminuíram em relação ao sinal da carga de 2N. Em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, as componentes tiveram menor intensidade. Comparando com o sinal da situação de equilíbrio, a componente de 30Hz teve menor intensidade enquanto as outras tiveram maior. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, as componentes de 30Hz e 120Hz tiveram menor intensidade enquanto as outras tiveram maior. Novamente, em ambos os sinais os ruídos característicos estão presentes.

Para a terceira situação de desequilíbrio, as componentes do sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 61, teve menor intensidade em relação aos sinais da primeira e segunda situações de desequilíbrio. Em relação ao sinal na situação de equilíbrio, as magnitudes das componentes de 60Hz e 90Hz foram maiores enquanto as outras foram menores. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, apenas a componente de 30Hz teve menor intensidade. No sinal de áudio, as componentes de 30Hz e 60Hz tiveram menor intensidade em relação aos sinais na primeira e segunda situações de desequilíbrio e na situação de equilíbrio enquanto as outras tiveram maior. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, apenas a componente de 20Hz teve menor intensidade. Novamente, em ambos os sinais os ruídos característicos estão presentes.

Para a carga de 2N, Figura 62, no sinal de vibração apenas a componente de 30Hz teve menor intensidade em relação aos sinais das primeira e segunda situações de desequilíbrio, da situação de equilíbrio e do equivalente do motor saudável. No sinal de áudio, a magnitude da componente de 90Hz foi maior em relação às situações já mencionadas. A componente de 60Hz teve menor magnitude em relação ao sinal da segunda situação de desequilíbrio e maior em relação aos outros. A componente de 30Hz foi menor em relação aos outros sinais. Por fim, ainda é possível observar os ruídos característicos em ambos os sinais.

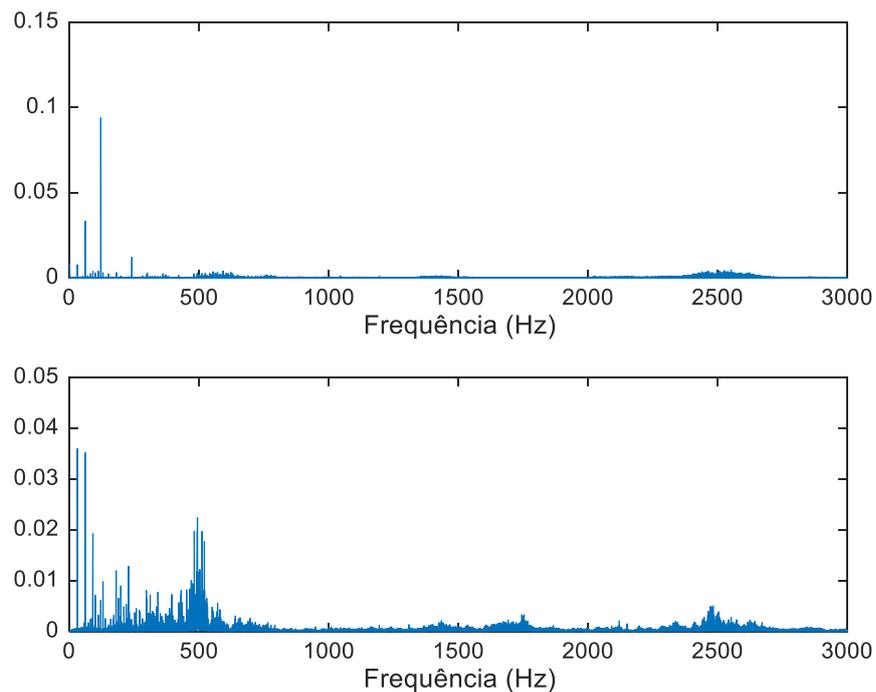
Para a carga de 4N, Figura 63, as componentes do sinal de vibração tiveram menor intensidade em relação aos sinais da carga de 2N e da segunda situação de desequilíbrio. Em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio, a componente de 60Hz teve maior intensidade e a de 120Hz foi maior, enquanto as outras ficaram com praticamente o mesmo valor. Em relação ao sinal da situação de equilíbrio, a componente de 60Hz teve menor intensidade enquanto as outras tiveram maior. Em relação ao sinal equivalente do motor saudável, apenas a componente de 30Hz teve menor magnitude. No sinal de áudio, a componente de 60Hz teve maior magnitude em relação aos outros sinais. A componente de 30Hz teve maior magnitude em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio e menor em relação aos outros. A componente de 90Hz teve maior intensidade em relação aos sinais da situação de equilíbrio e equivalente do motor saudável. Assim como nos outros sinais, em ambos aqui os ruídos estão presentes.

**Figura 60 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 2**



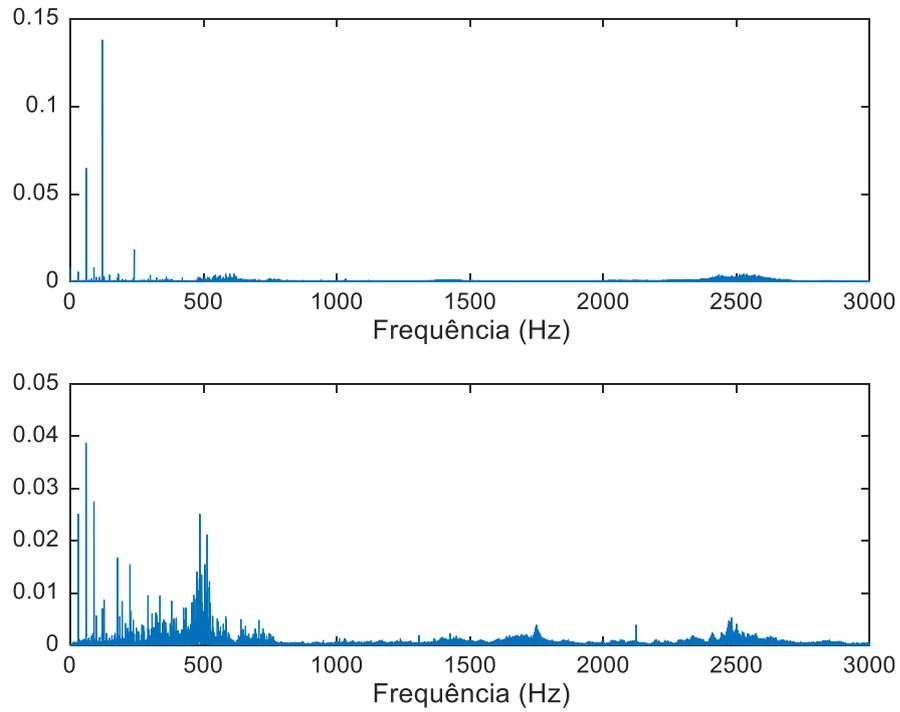
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 61 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 3**



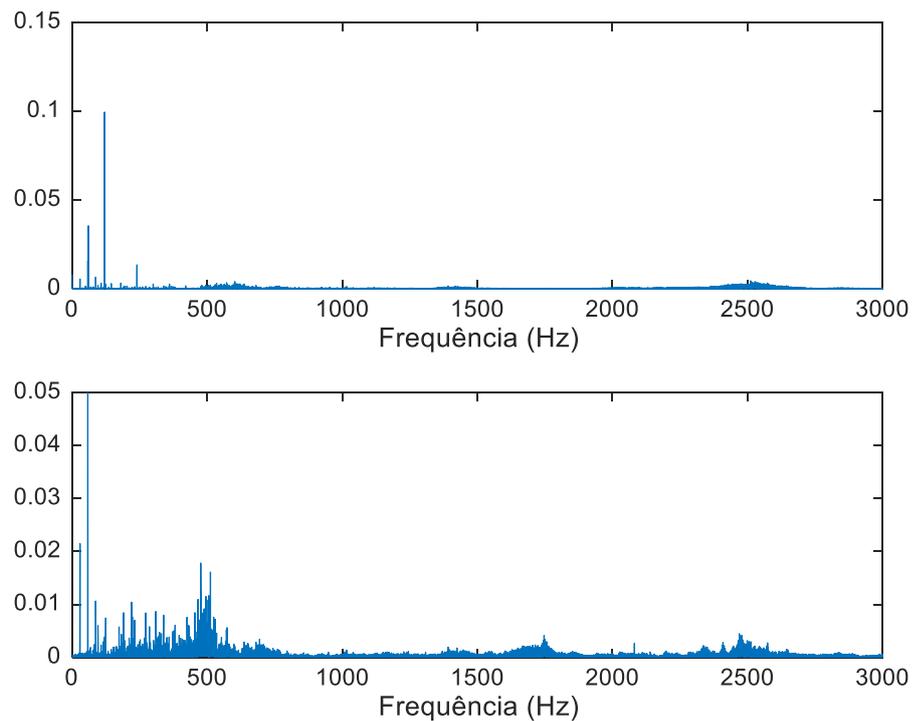
**Fonte: Autoria própria**

**Figura 62 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 3**



**Fonte: Autoria própria**

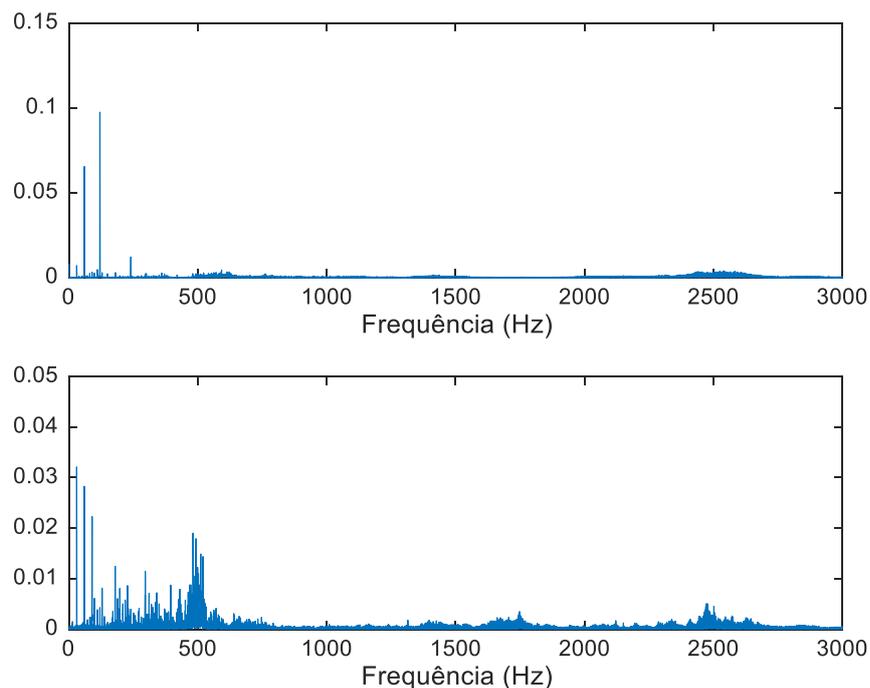
**Figura 63 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 3**



**Fonte: Autoria própria**

Para a quarta e última situação de desequilíbrio, a componente de 30Hz do sinal de vibração da carga de 0,4N, Figura 64, teve menor intensidade em relação aos sinais das situações de desequilíbrio e equivalente do motor saudável e maior em relação ao sinal em situação de equilíbrio. Já a componente de 60Hz teve maior intensidade em relação aos sinais nas situações de desequilíbrio, equilíbrio e equivalente do motor saudável. A componente de 120Hz teve maior intensidade em relação aos sinais da terceira situação de desequilíbrio e da situação de equilíbrio. A componente de 240Hz teve menor intensidade em relação ao sinal da segunda situação de desequilíbrio e maior em relação ao sinal equivalente do motor saudável, enquanto manteve praticamente o mesmo valor em relação aos outros. No sinal de áudio a magnitude da componente de 30Hz foi maior em relação aos sinais de desequilíbrio e menor em relação aos sinais da situação de equilíbrio e do equivalente do motor saudável. A componente de 60Hz teve maior magnitude em relação aos sinais de desequilíbrio e equilíbrio, e menor em relação ao sinal equivalente do motor saudável. A componente de 90Hz teve menor intensidade em relação ao sinal da primeira situação de desequilíbrio e maior em relação aos outros. Novamente os ruídos característicos estão presentes em ambos os sinais.

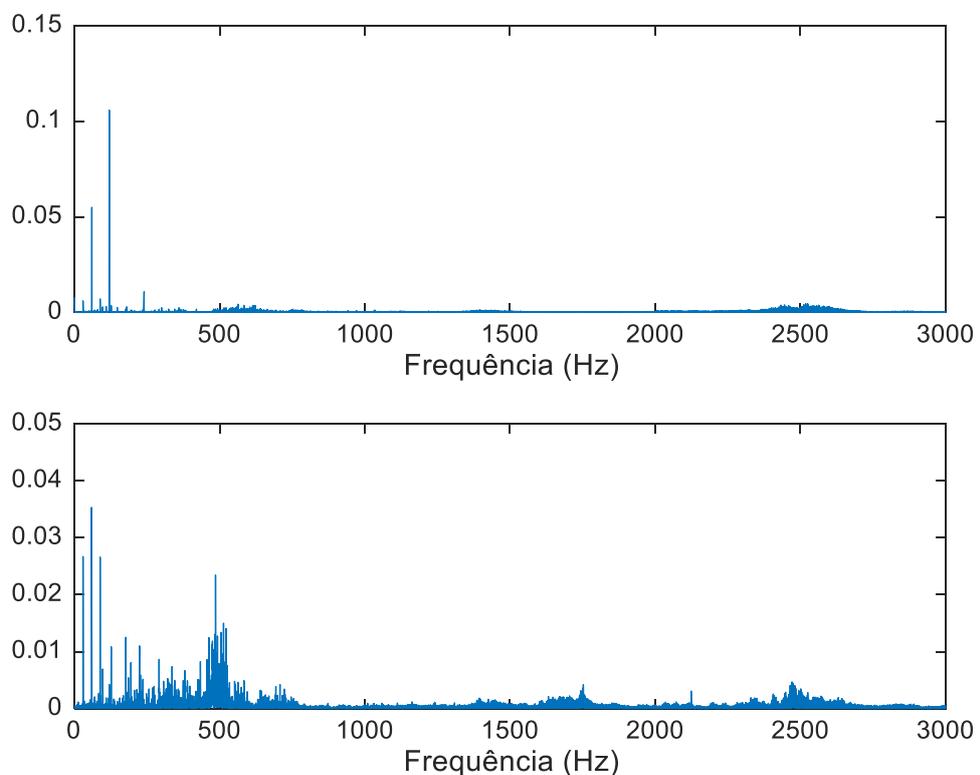
**Figura 64 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 0,4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 4**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 2N, Figura 65, no sinal de vibração é possível observar uma componente muito próxima à componente de 60Hz. A magnitude da componente de 30Hz é menor em relação ao sinal equivalente do motor saudável, maior em relação ao sinal em situação de equilíbrio e manteve praticamente o mesmo valor em relação aos outros. A componente de 60Hz é menor em relação ao sinal da terceira situação de desequilíbrio e ao da carga de 0,4N, e maior em relação aos outros. A componente de 120Hz teve maior intensidade em relação ao sinal em situação de equilíbrio e ao da carga de 0,4N, e menor em relação aos outros. A componente de 240Hz teve menor intensidade em relação aos outros sinais. No sinal de áudio a componente de 30Hz teve maior intensidade em relação ao sinal da terceira situação de desequilíbrio e menor em relação aos outros. A componente de 60Hz foi maior em relação ao sinal da situação de equilíbrio e ao sinal da carga de 0,4N. A componente de 90Hz foi menor em relação ao sinal da terceira situação de desequilíbrio e maior em relação aos outros. Os ruídos característicos ainda estão presentes nos sinais.

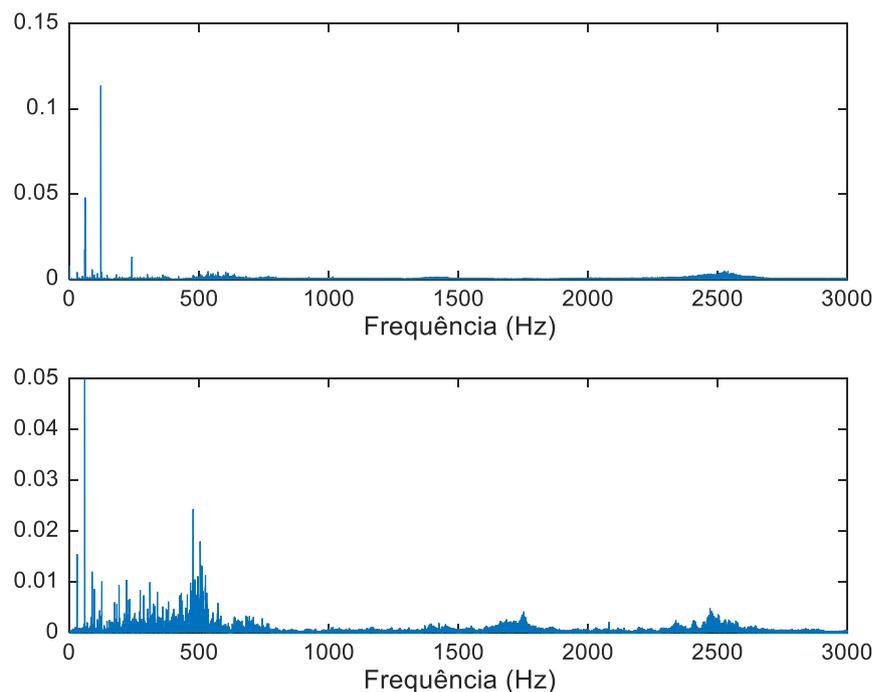
**Figura 65 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 2N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 4**



**Fonte: Autoria própria**

Para a carga de 4N, Figura 66, é possível observar no sinal de áudio uma componente muito próxima à componente de 60Hz. A componente de 30Hz teve menor intensidade em relação aos sinais na situação de desequilíbrio, equilíbrio, equivalente do motor saudável e da carga de 2N. A componente de 60Hz teve menor intensidade em relação ao sinal da carga de 2N e do sinal em situação de equilíbrio, e maior em relação aos outros. A componente de 120Hz teve menor intensidade em relação ao sinal da segunda situação de desequilíbrio e maior em relação aos outros. A componente de 240Hz teve maior intensidade em relação aos sinais da situação de equilíbrio, do sinal da carga de 2N e do sinal equivalente do motor saudável, enquanto manteve praticamente o mesmo valor em relação aos outros. No sinal de áudio, a componente de 30Hz teve menor intensidade em relação aos outros sinais da comparação. A componente de 60Hz teve praticamente o mesmo valor em relação ao sinal da terceira situação de desequilíbrio e maior em relação aos outros. A componente de 90Hz teve menor intensidade em relação aos sinais da carga de 2N, das primeira e segunda situações de desequilíbrio e da situação de equilíbrio, e maior em relação aos outros. Novamente, os ruídos característicos estão presentes em ambos os sinais.

**Figura 66 – FFT dos sinais de vibração e de áudio para carga de 4N do motor com problema de rolamento em desequilíbrio 4**



**Fonte: Autoria própria**

## 4.4 Características dos sinais de áudio e vibração

À primeira vista os sinais não parecem ter muito em comum, mas após analisar e comparar todos eles, foi possível identificar algumas características em comum entre os sinais de áudio e vibração, bem como características específicas dos problemas estudados.

Tanto no sinal de áudio quanto no sinal de vibração é possível notar componentes de 30Hz, 60Hz, 90Hz, 120Hz e 240Hz. Apesar das magnitudes serem diferentes em cada um dos sinais e de alguns serem visualmente diferentes, essas componentes estão presentes em todos os sinais.

A particularidade notada para os sinais de vibração do motor saudável foi que a componente de 30Hz possui mais relevância, mesmo que pouca, em relação aos problemas de rotor e rolamento, e sempre é a terceira maior em relação às outras. Nos sinais de áudio, a componente de 30Hz é a mais relevante para quase todas as amostras de sinais do motor saudável. Ou seja, se algum sinal, seja de vibração ou de áudio, com essas características for analisado, há uma grande chance de se tratar de um motor em condição mecânica saudável.

A particularidade notada para os sinais de vibração do motor com barras de rotor quebradas foi que a componente de 90Hz possui mais relevância do que a componente de 30Hz para cargas maiores do que 1N, sendo que a componente de 30Hz possui menor relevância do que a componente de 240Hz. Sendo assim, a componente de 90Hz ou a de 240Hz ocupam o posto de terceira maior em relação às outras. No sinal de áudio, as particularidades são o ruído que abrange as frequências de até cerca de 180Hz e a intensidade do som é bem menor em relação às outras situações. Ou seja, ao notar essas características em um sinal, pode se tratar de um motor com barras de rotor quebradas.

As particularidades notadas para os sinais de vibração do motor com problema de rolamento foi que há ruídos distribuídos pelo espectro de frequência, sendo que em torno da componente de 2,5 KHz esses ruídos intensificam-se e a componente de 240Hz é mais relevante do que as componentes de 30Hz e 90Hz. Nos sinais de áudio as particularidades foram os ruídos distribuídos pelo espectro de frequência, com maior intensidade entre as componentes de 200Hz e 600Hz e, assim como no sinal de vibração, em torno da componente de 2,5 KHz também há ruídos.

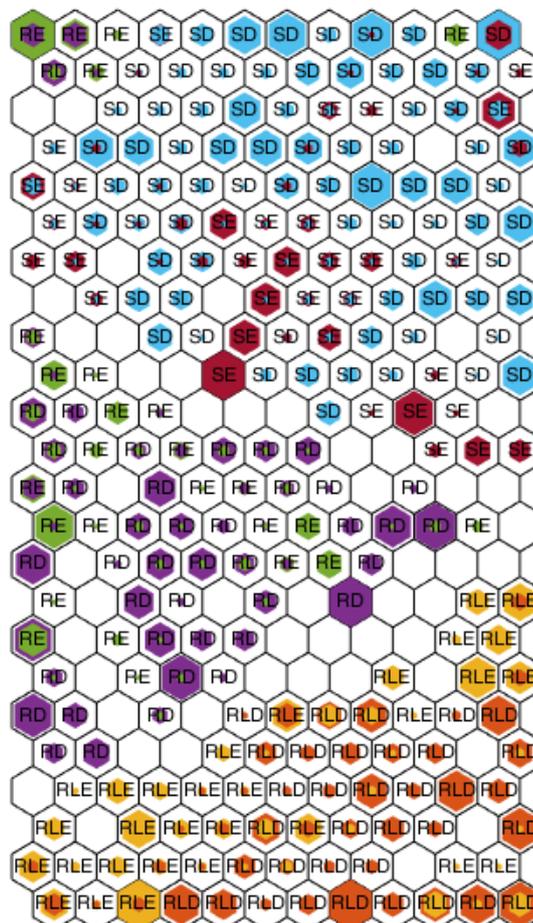
Sendo assim, se essas características forem observadas num sinal, é possível que o problema do motor seja no rolamento.

#### 4.5 Agrupamento no SOM

Para o agrupamento no SOM foram extraídas algumas características de todos os sinais de vibração e de áudio. Para a extração das características necessárias para o agrupamento, cada um dos sinais foi dividido em 45 sinais menores de 3 segundos, para que houvesse uma quantidade suficientemente grande de amostras para que ocorresse o agrupamento. As características extraídas foram as componentes de 30Hz, 60Hz, 90Hz, 120Hz, 240Hz, 2,5kHz. Tais características foram escolhidas com base na análise feita anteriormente de cada espectro de frequência dos sinais.

Para os sinais de vibração, o agrupamento ficou da forma mostrada na Figura 67.

**Figura 67 – Agrupamento dos sinais de vibração**



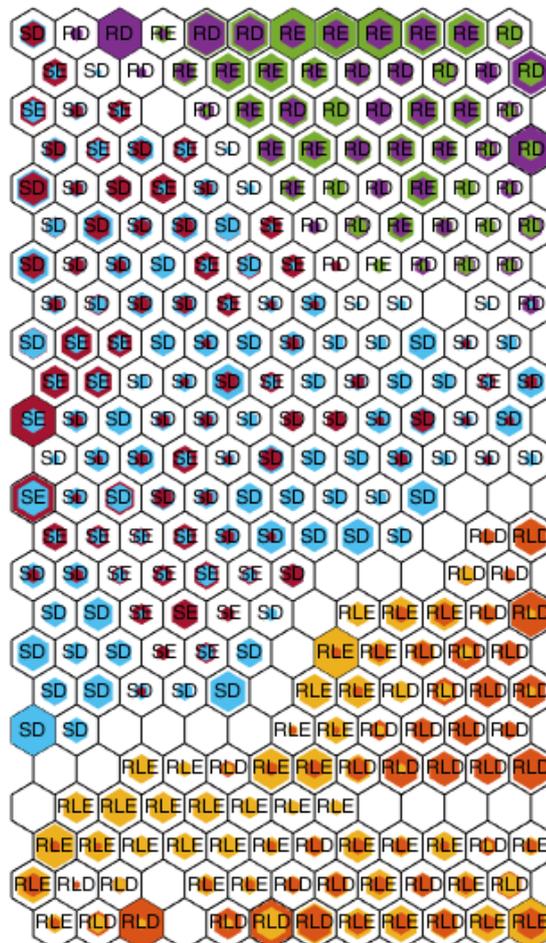
Fonte: Autoria própria

Sendo SE, SD, RE, RD, RLE, RLD as situações de motor saudável em equilíbrio, motor saudável em desequilíbrio, motor com barras de rotor quebradas em equilíbrio, motor com barras de rotor quebradas em desequilíbrio, motor com problema no rolamento em equilíbrio e motor com problema no rolamento em desequilíbrio, respectivamente.

É possível notar que o SOM foi capaz de agrupar os sinais dos motores saudáveis, com problema de rolamento e com barras de rotor quebradas, porém há uma certa confusão quando se trata de agrupar essas situações em relação ao equilíbrio ou desequilíbrio elétrico.

Para os sinais de áudio, o agrupamento ficou da forma mostrada na Figura 68.

**Figura 68 – Agrupamento dos sinais de áudio**



**Fonte: Autoria própria**

Assim como ocorre no agrupamento do sinal de vibração, no sinal de áudio o SOM também foi capaz de agrupar os sinais dos motores saudáveis, com problema de rolamento e com barras de rotor quebradas, mas há uma certa confusão, maior

ainda que o agrupamento dos sinais de vibração, quando se trata de agrupar essas situações em relação ao equilíbrio ou desequilíbrio elétrico.

Ao comparar os dois agrupamentos, observa-se que a posição do motor com problema de rolamento no agrupamento é praticamente a mesma, e o motor saudável é o que abrange o maior espaço no agrupamento, sendo que no agrupamento dos sinais de áudio esse espaço é bem maior em relação ao agrupamento dos sinais de vibração. Assim como já constatado anteriormente, os dois agruparam muito bem em relação às condições mecânicas dos motores, porém teve uma certa confusão em relação às condições elétricas.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se fazer uma comparação, tanto visual quanto por meio de redes neurais, entre sinais de áudio e de vibração aplicados à detecção de falhas em motores de indução trifásicos, utilizando seus espectros de frequências para tal comparação.

Por meio da comparação visual dos espectros, foi possível constatar que tanto os sinais de áudio quanto os de vibração possuem características relacionadas diretamente às condições mecânicas do motor, sendo possível determinar qual é o problema do mesmo por meio de uma análise dos sinais e que, mesmo que sejam diferentes, há uma relação entre ambos os sinais, principalmente relacionada às componentes de frequências utilizadas na comparação.

A rede neural foi capaz de agrupar as características de ambos os sinais, mostrando, novamente, que cada condição mecânica gera uma característica própria nos sinais de áudio e de vibração. O problema principal da rede neural foi que ela não foi capaz de agrupar muito bem os sinais em relação às condições elétricas.

Por fim, a conclusão principal que se pode tirar do trabalho é que é possível, após mais estudos e pesquisas na área, substituir a análise de vibração por uma análise de áudio, sendo que esta será não invasiva e possivelmente terá um menor custo, impactando positivamente na indústria.

## REFERÊNCIAS

- BEHRINGER. **ECM8000**. Disponível em: <<https://www.behringer.com//Categories/Behringer/Microphones/Condenser/ECM8000/p/P0118>> Acesso em: 08 de maio de 2018;
- CALACHE, D. C. **Caracterização de um acelerômetro baseado em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 2013. 90f. Monografia – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- CAMPBELL, M. e ARCE, G.; Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: Test and evaluation. In: **2016 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)**. IEEE. 2016, Filadélfia. P. 1-7.
- FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- GLOWACZ, A. Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor. **Applied Acoustics**, 2018, v. 137, p. 82-89
- HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HAYKIN, S. **Neural Networks and Learning Machines**. 3. ed. New Jersey: Bookman, 2009.
- HENRÍQUEZ, P.; ALONSO, J.B; FERRER, M.A.; TRAVIESO C.M.; GÓMEZ, G. Fault Diagnosis using Audio and Vibration Signals in a Circulating Pump. **International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering (COMADEM 2012)**. 25, 2012, Huddersfield, v. 360, p. 1-13.
- LIMA, Washington Batista de. **Transdutores de deformação a base de sensores piezoelétricos**. 2013. 69f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2013.
- MMTEC. **Qual a importância da análise de vibração?** 2017. Disponível em: <<http://www.mmtec.com.br/importancia-da-analise-de-vibracao/>> Acesso em: 06 de maio de 2018.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1996
- OLIVEIRA, J. R. de. **A aplicação de microfones em projeto digitais**. Curso de Laboratório de Micro e Minicomputadores. Abril de 2010. Notas de Aula. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp.
- RIBEIRO, Diogo Aranha. **Análise de vibração em motores elétricos com mouse óptico**. 2017. 69f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017

ROCHA, F.S. da; MARRANGHELLO, G. F. **Propriedades de um acelerômetro eletrônico e possibilidades de uso no ensino de mecânica.** *Latin American Journal of Physics Education*, v. 13, n. 1, p. 37-46, Março, 2013.

SILVA, I.N. da; SPATTI D.; e FLAUZINO, R.. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático.** 1. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2010.

TAYLOR, J. I. **The vibration analysis handbook.** 1. ed. Flórida: Vibration Consultants, 1994.

THOMANN. **Focusrite Scarlett 2i2 2nd Gen.** 2016. Disponível em: <[https://www.thomann.de/pt/focusrite\\_scarlett\\_2i2\\_2nd\\_gen.htm/](https://www.thomann.de/pt/focusrite_scarlett_2i2_2nd_gen.htm/)> Acesso em: 12 de maio de 2018.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

VALLE, S. do. **Microfones.** 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Música & Tecnologia, 2002.

VESANTO, J. et al. **SOM toolbox for Matlab 5.** Technical report A57. Helsinki University of Technology. Finlândia, 2000. 26 p.