



PPGEM

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise de falhas em rolamentos por análise de
vibração aplicado a aerogeradores**

ISAC BARBOSA DE ALMEIDA

NATAL/RN, 2016

ISAC BARBOSA DE ALMEIDA

**Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração
aplicado a aerogeradores**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio
Grande do Norte para obtenção
do título de Mestre em
Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Efrain Pantaleón Matamoros

NATAL/RN, 2016

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Almeida, Isac Barbosa de.

Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicado a aerogeradores / Isac Barbosa de Almeida. - Natal, RN, 2016.

77 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Efrain Pantaleón Matamoros.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Análise de Sinais - Dissertação. 2. Aerogerador - Dissertação. 3. Manutenção preditiva - Dissertação. 4. Rolamentos - Dissertação I. Matamoros, Efrain Pantaleón. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 62-233.27

DEDICATÓRIA

Dedico este mestrado a Deus, que me deu forças para concluir esse trabalho, e à minha família, que me apoiou e incentivou durante todo o mestrado.

Dedico a vocês o sucesso deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por estar sempre disposto a me ajudar e caminhar comigo, por me guiar sempre pelos caminhos corretos e me orientar nas escolhas mais difíceis.

Aos meus pais, João Maria Barbosa de Moura e Márcia Freire de Almeida Moura, e ao meu irmão, Abraão Barbosa de Almeida, que me incentivaram e me apoiaram para concluir este trabalho, dando todo suporte que precisei em todas as áreas.

Ao meu mentor, orientador e amigo, professor Dr. Efrain Pantaleón Matamoros, por todos ensinamentos e conselhos dados sobre esta tese, minha gratidão por ter aceito o desafio de orientar este trabalho.

Aos meus amigos Edilson Marinho e Ítalo Bruno por todo apoio a este trabalho.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Norte em especial ao Grupo de Estudos em Tribologia e seus integrantes, em especial a Jarbas Santos por ter incentivado e ajudado a superar os obstáculos encontrados.

RESUMO

ALMEIDA, I. B. – Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicado a aerogeradores. Natal/RN, 2016. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Com a intensa utilização de rolamentos em diversos segmentos da indústria, há um elevado número de interrupções necessárias nos processos industriais para a realização de manutenções nesses dispositivos, tendo como estudo de caso os aerogeradores. O crescimento do setor de energia eólica, incentivou a realizar uma pesquisa que auxilie a solução desse problema. Para contribuir com a manutenção preditiva foi realizada uma análise de sinais aplicando técnicas que permitem a detecção e a localização do problema a fim de evitar acidentes e prejuízos ocasionados por falhas inesperadas nos equipamentos, visto que a baixa rotação do sistema dificulta a detecção da falha. Para solucionar esse problema, realizou-se a indicação de sinais padrão para os defeitos nos rolamentos, facilitando o diagnóstico de possíveis falhas. Com esse diagnóstico pode ser executada uma manutenção preditiva, identificando a falha do sistema que foram testadas, como a introdução de grãos de areia no rolamento, desgaste na pista externa do rolamento e oxidação do rolamento. Através do processamento de sinais é possível construir os gráficos desenvolvendo um mapeamento dos defeitos através de diferentes picos nas faixas de frequência.

Palavras-Chave: Análise de Sinais, Aerogerador, Manutenção preditiva, Rolamentos.

ABSTRACT

ALMEIDA, I.B. – Failure analysis on bearing vibration analysis applied to wind turbines. Natal / RN, 2016. Masters Dissertation - Federal University of Rio Grande do Norte.

With the heavy use of bearings in various segments of the industry, there are a large number of necessary interruptions in industrial processes to perform maintenance on these devices, with the case study wind turbines. The growth of the wind energy sector, encouraged to conduct research that helps to solve this problem. To contribute to predictive maintenance has been carried out a signal analysis using techniques which allow detection and location of the problem in order to prevent accidents caused and losses due to unexpected equipment failures, whereas low system rotation complicates the detection of the failure. To work around this problem, there was the indication of standard signals for defects in the bearings, making diagnosis of possible failures. With this diagnosis can be performed predictive maintenance, identifying the failure of the system that were tested, such as the introduction of grains of sand in the bearing, wear on the outer race of the bearing and bearing rust. By processing signals it is possible to construct graphs developing a mapping of defects by different peaks in the frequency band.

Keywords: Signal Analysis, Wind turbine, Predictive maintenance, Bearings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capacidade de geração de energia no Brasil e empreendimentos em operação.....	6
Figura 2. A) Moinho de vento persa, B) <i>Sail windmill</i> , C) <i>Post mill</i>	7
Figura 3. Turbina eólica americana	8
Figura 4. Turbina eólica de Charles Brush	8
Figura 5. Turbina eólica de Darrieus	9
Figura 6. Princípio da turbina eólica de Savonius	10
Figura 7. Componentes de um aerogerador	11
Figura 8. Componentes de um rolamento	13
Figura 9. Frequências, dimensões e ângulo de contato do rolamento	13
Figura 10. Velocidades dos elementos do rolamento.....	14
Figura 11. Pico e valor de rms para um rolamento com defeito	19
Figura 12. (a) Pico e valor de rms (b) fator de crista	19
Figura 13. Aplicação da FFT em um sinal	20
Figura 14. Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert	22
Figura 15. Mancal F205 para rolamento do aerogerador	24
Figura 16. Mancal P205 para rolamento do aerogerador	25
Figura 17. Rolamento UC 205	26
Figura 18. Dimmer	27
Figura 19. Bancada experimental para simulação do aerogerador.....	28
Figura 20. Bancada experimental durante ensaio.....	28
Figura 21. Rolamento oxidado.....	29
Figura 22. Peneira (A) e grãos de areia (B)	29
Figura 23. Rolamento com introdução de grãos de areia	30
Figura 24. Rolamento com desgaste na pista externa	30
Figura 25. Módulo condicionador de sinais NI9234	31
Figura 26. Sistema de aquisição de dados e módulo condicionador de sinais	32
Figura 27. Acelerômetro utilizado para captação do sinal	32
Figura 28. Acelerômetro montado na bancada.....	33
Figura 29. Tacômetro Minipa MDT 2238	34
Figura 30. Esquema gráfico da configuração de montagem do sistema de medição	35
Figura 31. Amostra do material polido.....	36
Figura 32. Análise metalográfica do aço AISI 4140 com zoom (A) 200x, (B) 500x, (C) 1000x	37
Figura 33. Endentação da microdureza Vickers.....	38
Figura 34. Resultado obtido no teste de microdureza	38
Figura 35. Sinal sem defeito amplitude x tempo.....	39
Figura 36. Sinal sem defeito com aplicação do filtro	40
Figura 37. PSD do sinal do rolamento sem defeito.....	40
Figura 38. Aproximação do sinal após a PSD	41
Figura 39. Sinal após aplicação da STFT em três dimensões.....	42
Figura 40. Sinal do rolamento com grãos de areia amplitude x tempo.....	43
Figura 41. Sinal do rolamento com grãos de areia com aplicação do filtro	43
Figura 42. PSD do sinal do rolamento com grãos de areia	44
Figura 43. Sinal com introdução de grãos de areia após aplicação da STFT em três dimensões.....	45
Figura 44. Sinal do rolamento com desgaste na pista externa amplitude x tempo ...	46

Figura 45. Sinal do rolamento com desgaste na pista externa com aplicação do filtro	46
Figura 46. PSD do sinal do rolamento com desgaste na pista externa	47
Figura 47. Sinal com degaste na pista externa após aplicação da STFT em três dimensões.....	48
Figura 48. Sinal do rolamento oxidado amplitude x tempo	49
Figura 49. Sinal do rolamento oxidado com aplicação do filtro.....	49
Figura 50. PSD do sinal do rolamento oxidado	50
Figura 51. Sinal oxidado após aplicação da STFT em três dimensões.....	51
Figura 52. Ensaio 1 - Sinal do rolamento sem defeito amplitude x tempo (s)	64
Figura 53. Ensaio 2 - Sinal do rolamento sem defeito amplitude x tempo (s)	64
Figura 54. Ensaio 3 - Sinal do rolamento com grãos de areia amplitude x tempo (s)	65
Figura 55. Ensaio 4 - Sinal do rolamento com grãos de areia amplitude x tempo (s)	65
Figura 56. Ensaio 5 - Sinal do rolamento com desgaste na pista externa amplitude x tempo (s)	66
Figura 57. Ensaio 6 - Sinal do rolamento com desgaste na pista externa amplitude x tempo (s)	66
Figura 58. Ensaio 7 - Sinal do rolamento oxidado amplitude x tempo (s)	67
Figura 59. Ensaio 8 - Sinal do rolamento oxidado amplitude x tempo (s).....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões para os rolamentos de acordo com os mancais tipo F	25
Tabela 2. Dimensões para os rolamentos de acordo com os mancais tipo P	26

SUMÁRIO

CAPÍTULO UM: INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. OBJETIVO GERAL.....	3
1.2.1. <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO DOIS: REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Desenvolvimento da energia eólica	5
2.1.1. <i>Aproveitamento eólico</i>	7
2.1.2. <i>Componentes das turbinas eólicas</i>	11
2.2. Rolamentos	12
2.2.1. <i>Frequências características de falhas em rolamentos</i>	13
2.2.1.1. <i>Frequência característica da gaiola</i>	15
2.2.1.2. <i>Frequência característica da pista interna</i>	16
2.2.1.3. <i>Frequência característica da pista externa</i>	16
2.2.1.4. <i>Frequência característica nas esferas</i>	17
2.3. Técnicas de detecção de falhas em rolamentos.....	17
2.3.1. <i>Domínio do tempo</i>	18
2.3.2. <i>Domínio da frequência</i>	19
2.3.3. <i>Domínio do tempo-frequência</i>	22
CAPÍTULO TRÊS: MATERIAIS E MÉTODO	24
3.1. Desenvolvimento de bancada experimental.....	24
3.1.1. <i>Critérios para seleção do eixo</i>	24
3.1.2. <i>Critérios para seleção do rolamento</i>	24
3.1.3. <i>Critérios para seleção do motor</i>	27
3.2. Falhas nos rolamentos	29
3.3. Medição da vibração	31
3.4. Medição da velocidade de rotação	34
3.5. Esquema da bancada experimental	35
3.6. Análise metalográfica do material	36
3.7. Ensaio de microdureza do material	38
CAPÍTULO QUATRO: RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. Rolamento sem defeito	39
4.2. Rolamento com grãos de areia	42
4.3. Rolamento com desgaste na pista externa	45
4.4. Rolamento oxidado	48
CAPÍTULO CINCO: CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	52
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICE I – PROGRAMAS PARA ANÁLISE DOS SINAIS DO ROLAMENTO	57
APÊNDICE II – ENSAIOS DE REPETIÇÕES	63

CAPÍTULO UM: INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento de diversos setores industriais não só nacionalmente, mas de forma universal, tem necessitado de energia para sustentar suas produções, e com a dificuldade atual da obtenção de energia e sua valorização, foi necessário desenvolver novas fontes de energia. Dessa forma a energia eólica tem aparecido no cenário industrial, influenciando a conservação ambiental.

A energia eólica é obtida indiretamente através da energia do sol, que com o aquecimento desigual da superfície desenvolve a movimentação das correntes de ar, conhecido como vento. A energia cinética do vento move as pás da turbina eólica, que é responsável pela conversão dessa energia em energia elétrica.

A turbina eólica, aerogerador, converte a energia ao rotacionar o rotor em uma baixa rotação no qual está acoplado um multiplicador de rotação, formado por um conjunto de engrenagens, com o intuito de elevar a rotação de entrada no sistema. Um eixo de elevada rotação é conectado ao gerador que tem a função de converter a energia mecânica em energia elétrica.

O eixo primário do aerogerador é conectado as pás, por isso rotaciona a uma baixa velocidade, e esse eixo está montado em dois rolamentos que suportam a carga do rotor, a maior carga do sistema.

Observada a utilização de análise de sinais em rolamentos em elevadas rotações, realizou-se um estudo para prevenir as falhas nos rolamentos a baixas rotações, como no caso do eixo primário do aerogerador. O estudo levou ao desenvolvimento de uma ferramenta que servirá para realizar uma manutenção preditiva no qual não será necessário a pausa do sistema pois prevê futuras falhas dos rolamentos do dispositivo.

A simulação do aerogerador foi realizada com uma bancada experimental, da qual o material escolhido foi o mesmo utilizado no eixo primário, esse eixo rotacionou em baixa rotação através de um motor elétrico, que substituiu as pás do rotor recebendo a energia cinética do vento. Os rolamentos também foram selecionados

através da sua utilização na turbina eólica, o mesmo tipo de rolamento adaptado a um eixo de menor diâmetro.

O sinal produzido através do experimento foi captado por um acelerômetro que mediu o nível de vibração do rolamento. Para isso foi ligado o sensor diretamente na parte externa do mancal, com o eixo rotacionando junto com o rolamento. O grande desafio do estudo foi analisar as falhas a partir de uma baixa rotação, pois resulta em uma menor faixa de frequência, dificultando a análise.

O estudo foi realizado aplicando diferentes defeitos aos rolamentos e os colocando no sistema para verificar suas mudanças de sinais e depois serem analisadas. Dessa forma, foi introduzido o defeito de desgaste da pista interna do rolamento, oxidação das esferas e pista interna e contaminação no interior do rolamento. Com isso, é realizado o mapeamento de sinais, para servir como modelo preventivo para outros sistemas de aerogeradores.

Através da introdução dos defeitos nos rolamentos, analisando os sinais obtidos com o experimento na bancada, é possível padronizar os sinais de defeitos para o sistema, prevendo dessa forma os defeitos nos rolamentos sem a necessidade de parar o processo de geração de energia e desmontar o rolamento.

Dessa forma, através da dissertação são observados os resultados dos quais foram obtidos e analisados os sinais para a realização da manutenção preditiva, utilizando métodos para sobressair aos dados da análise de sinais em baixa rotação no sistema.

1.2. *Objetivo geral*

Desenvolver uma ferramenta para auxiliar na manutenção preditiva dos rolamentos da turbina eólica, através de um modelo similar elaborado no laboratório, realizando o mapeamento de sinais padrão com a introdução de defeitos nos rolamentos do eixo primário.

1.2.1. *Objetivos específicos*

- Elaborar uma bancada que simule o eixo primário do aerogerador;
- Analisar sinais em sistema de baixa rotação, verificando se seus resultados são satisfatórios;
- Identificar o problema do rolamento através da vibração apresentada;
- Realizar o mapeamento de sinais padrões para as falhas no rolamento.

1.3. *Estrutura da dissertação*

Essa dissertação está subdividida em 5 capítulos e nesse primeiro capítulo foi descrito uma breve contextualização da necessidade da manutenção preditiva e da análise de sinais, bem como os benefícios dessa prática e os objetivos desse trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre a importância da energia eólica no setor industrial, explicando a obtenção e conversão até se chegar à energia elétrica. Outro fator visto nesse capítulo é o desenvolvimento e captação do sinal, bem como técnicas envolvidas para manusear e interpretar os sinais adquiridos nos experimentos.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e o método utilizado nesse trabalho, inclusive a especificação do material do eixo, tipos e dimensões dos

rolamentos e informações sobre o motor utilizado, detalhando também os instrumentos utilizados no experimento do trabalho, e suas formas de medições

Os resultados das análises, assim como as discussões são debatidos no capítulo 4, onde são mostrados resultados por meio dos gráficos dos sinais e verificação dos dados obtidos nos ensaios, observando se realmente os objetivos do trabalho foram atingidos. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões da dissertação e propostas futuras.

CAPÍTULO DOIS: REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Desenvolvimento da energia eólica

“A questão energética é um dos tópicos de maior importância na atualidade. A qualidade de vida de uma sociedade está intimamente ligada ao seu consumo de energia. O crescimento da demanda energética mundial em razão da melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento traz a preocupação com alguns aspectos essenciais para a política e planejamento energético de todas as economias emergentes. Dentre eles, pode-se citar a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento social e econômico de um país e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo de energia.” (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

De acordo com Dantas e Leite (2009) há inúmeros benefícios na inserção da energia eólica para a segurança da matriz elétrica brasileira, devido à sua complementaridade com o regime hídrico, auxiliando também na manutenção do caráter limpo e renovável da matriz brasileira. Um fator negativo da energia eólica, é o elevado valor da implementação no território brasileiro, quando comparado ao valor gasto em outros países.

A energia dos ventos pode ser explicada, em termos físicos, como a energia cinética formada nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento é feito por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação. Para a produção de energia elétrica, são utilizadas turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores, e para a realização de trabalhos mecânicos, cata-ventos de diversos tipos (ALVES, 2006).

Conforme Alves (2010) as regiões Nordeste e Norte são consideradas as áreas com melhores potenciais de se captar a energia eólica no Brasil, pois demonstra vantagens, como condições climáticas, na opção pelo investimento em geração de energia eólico-elétrica. Após o estudo de várias instituições, mapeando os fortes ventos que resultarão em benefícios para a captação de energia, foi observado vento de velocidade favorável e constante na costa nordestina, praticamente durante todo o

ano. Por isso, a região Nordeste foi uma das pioneiras na instalação de energia eólica para o aproveitamento na geração de energia elétrica.

De acordo com a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, é possível observar o crescimento do setor eólico no país, através da capacidade de geração de energia do Banco de Informações de Geração, demonstrados na Figura 1.

Figura 1. Capacidade de geração de energia no Brasil e empreendimentos em operação

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	505	336.553	338.231	0,25
EOL	264	6.448.233	6.358.397	4,62
PCH	474	4.820.644	4.798.550	3,49
UFV	23	15.233	11.233	0,01
UHE	200	87.308.465	85.078.338	61,79
UTE	2.653	40.663.506	39.105.492	28,4
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,45
Total	4.121	141.582.634	137.680.241	100
Empreendimentos em Construção				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%	
CGH	1	848	0	
EOL	115	2.834.010	13,14	
PCH	37	428.225	1,99	
UHE	11	15.269.142	70,81	
UTE	22	1.681.759	7,8	
UTN	1	1.350.000	6,26	
Total	187	21.563.984	100	
Empreendimentos com Construção não iniciada				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%	
CGH	42	28.149	0,15	
CGU	1	50	0	
EOL	330	7.779.684	40,88	
PCH	128	1.818.819	9,56	
UFV	38	1.048.208	5,51	
UHE	4	447.000	2,35	
UTE	130	7.909.483	41,56	
Total	673	19.031.393	100	

Fonte: Banco de Informações de Geração da ANEEL – julho/2015.

A legenda para os tipos de energia apresentados na Figura 1 são: CGH – Central Geradora Hidrelétrica, CGU – Central Geradora Undi-elétrica, EOL – Central Geradora Eólica, PCH – Pequena Central Hidrelétrica, UFV – Central Geradora Fotovoltaica, UHE – Usina Hidrelétrica, UTE – Usina Termelétrica, UTN – Usina Termonuclear.

De acordo com a ANEEL, o Brasil possui no total 4121 empreendimentos em operação, totalizando 137.680.241 kW de potência instalada. Está prevista para os

próximos anos uma adição de 40.595.377 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 187 empreendimentos atualmente em construção e mais 673 em empreendimentos com construção não iniciada.

Com a operação dos empreendimentos em construção, é observado o crescimento do setor eólico de 4,62% para 13,14% do total de energia gerado no país, e esse índice é ainda maior se avaliado os empreendimentos com construção não iniciada, atingindo 40,88%. Repara-se então, a importância da energia eólica no Brasil.

2.1.1. Aproveitamento eólico

O aproveitamento da energia eólica pelo homem teve início na antiguidade. De acordo com Heier (2006), a conversão da energia primária em energia mecânica ocorreu através da utilização de moinhos de vento, utilizado com a finalidade de auxiliar as atividades agrícolas. Os moinhos de vento são usados há mais de 1000 anos e sua origem foi no Oriente Médio no século VII d.C., a partir daí os moinhos de vento foram uma parte integrante na economia rural. Indícios de moinhos de vento e o seu uso datam o século X na Pérsia. Foram utilizados eixos verticais aplicando o princípio de arrasto da energia do vento em algumas construções, este tipo de moinho foi encontrado nos países árabes.

Figura 2. A) Moinho de vento persa, B) Sail windmill, C) Post mill



Fonte: <http://www.deutsches-museum.de> (2015).

Os moinhos de vento foram trazidos para a Europa pelas cruzadas na Idade Média, e incorporaram velas e o eixo horizontal, denominando-se *sail windmill*, com o seu desenvolvimento surgiu o Post Mills, usado com o intuito de bombear água e

cultivar a terra. A partir do século XIX, nos Estados Unidos da América, foram utilizadas turbinas eólico multi-lâmina, demonstrada na Figura 3. Este tipo de turbina foi utilizado na irrigação.

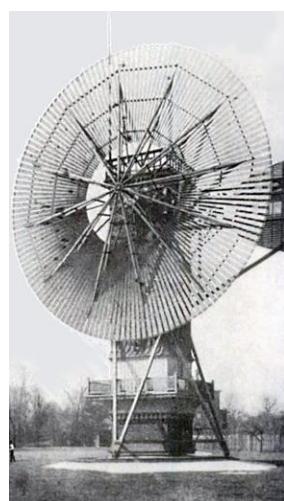
Figura 3. Turbina eólica americana



Fonte: BOLDUAN (2011).

Segundo Alves (2010), um dos pioneiros da indústria elétrica americana foi Charles Brush, que inventou o dínamo DC usado para a produção de energia elétrica, e em 1887, realizou seu sistema de produção de energia eólica, uma turbina de 12 kW de potência, formada por 144 lâminas com 17 m de diâmetro e 18 m de altura construída de madeira. Apresentada na Figura 4.

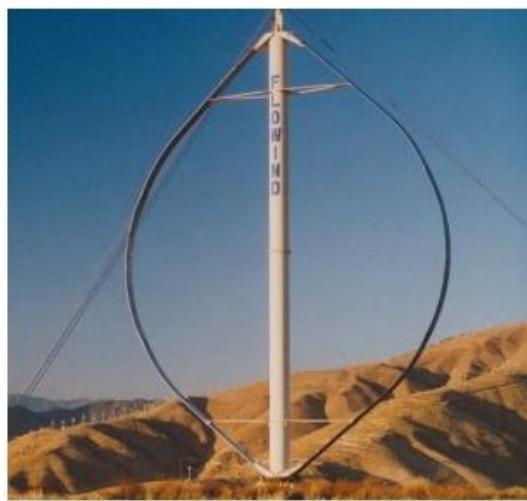
Figura 4. Turbina eólica de Charles Brush



Fonte: aulaverde.masverdedigital.com (2015).

Por volta de 1930, o engenheiro aeronáutico francês Jean Marie Georges Darrieus patenteou um novo tipo de turbina eólica, de eixo vertical, VAWT, que significa que o eixo do rotor principal corre verticalmente. O grande benefício da turbina de Darrieus é que não importa o caminho do vento, a turbina agirá normalmente. Contudo um fator negativo, é que por funcionar a uma altura próxima do solo, há uma velocidade muito baixa do vento na parte inferior do rotor. Outro fator negativo é que necessita de motor de arranque para iniciar seu funcionamento, além disso, para substituir o rolamento do rotor é necessário retirar o rotor da turbina, abrindo todo o sistema. Na Figura 5 é observada a turbina eólica de Darrieus.

Figura 5. Turbina eólica de Darrieus



Fonte: wiki.duke.edu (2015).

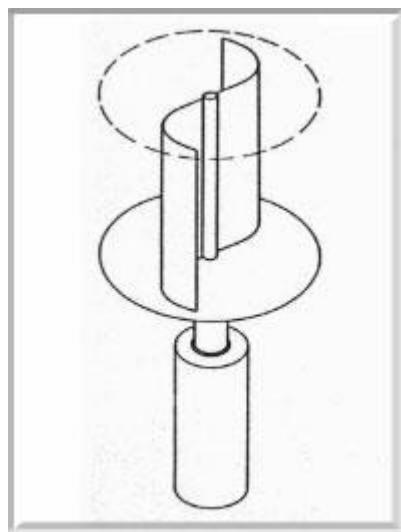
Segundo Heier (2006), somente nos anos 50 foi que apareceram os primeiros parques eólicos de produção em massa, construído pelo alemão Allgaier, e a partir de 1970 foram criadas empresas no mercado internacional responsável pela produção de turbinas eólicas. E de acordo com Ferreira (2011), entre 1998 e 2002 surgiram turbinas na gama do megawatt, e após 2002 foi verificada a massificação de modelos de turbinas eólicas, sendo assim, as empresas do setor de energia eólica criaram novos modelos, mais eficientes e atrativos de aerogeradores.

2.1.1. Funcionamento das turbinas eólicas

Os aerogeradores são divididos em dois tipos; de eixo horizontal e de eixo vertical. De acordo com Maia (2012), os aerogeradores de eixo vertical possuem a

vantagem de não necessitarem de mecanismos para acompanhar as variações das direções do vento, reduzindo a complexidade do seu projeto, como a turbina de Darrieus. Outra turbina eólica de eixo vertical bastante utilizada é a de Savonius, formado por duas pás semicirculares colocadas uma justaposta à outra em cada nível de pás que tem como força predominante a força de arrasto, dessa forma as turbinas giram predominantemente pela pressão do ar sobre as turbinas, sendo a turbina menos eficiente para a geração de energia elétrica, porém requer menor custo para sua fabricação.

Figura 6. Princípio da turbina eólica de Savonius



Fonte: www.reuk.co.uk (2015).

Em sua dissertação, Maia (2012), apresenta que as turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais comuns, e grande parte do setor eólica está voltado para esse tipo de aerogeradores, que são movidos por forças aerodinâmicas, chamadas forças de arrasto (*drag*) e forças de sustentação (*lift*).

“Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente, as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo). ” (MAIA, 2012)

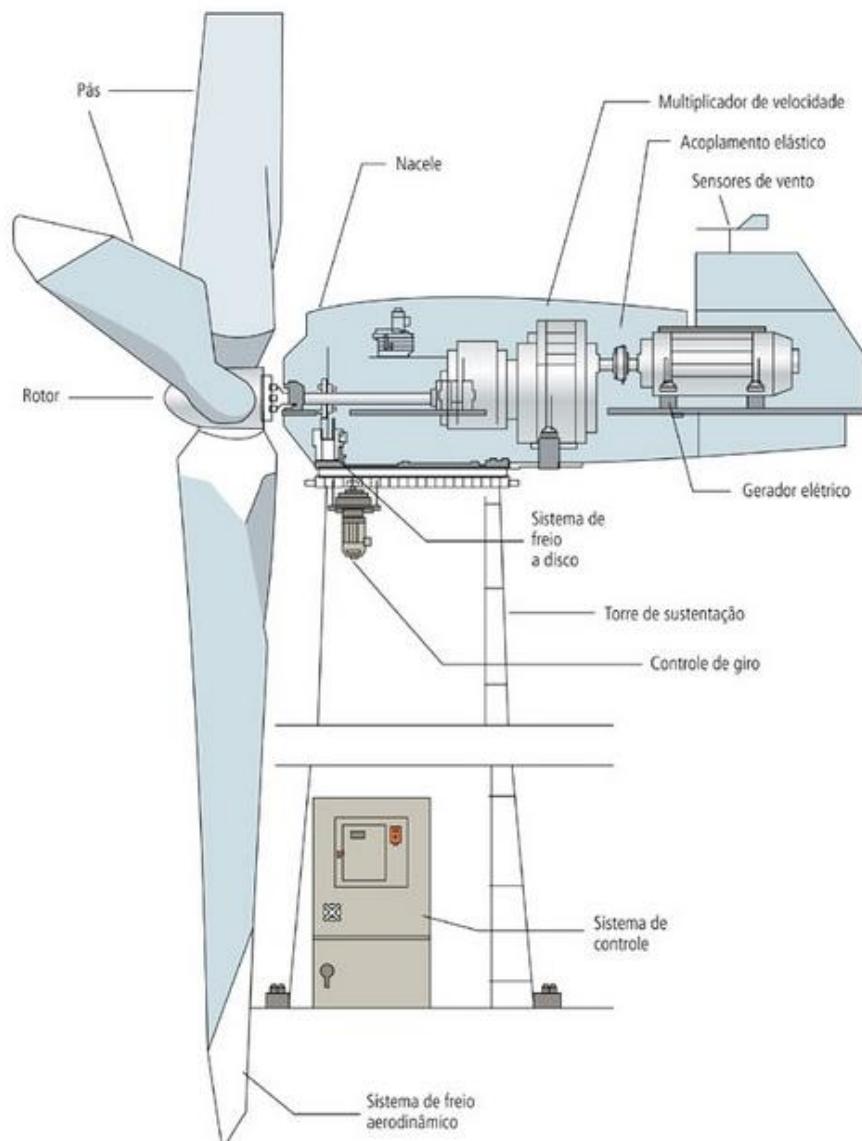
A força predominante na movimentação do rotor do aerogerador de eixo horizontal é a força de sustentação, além disso, o aerogerador possui um mecanismo

capaz de permitir que o círculo descrito pelas pás esteja sempre em direção perpendicular ao vento. Esses rotores podem ser constituídos por uma pá e um contrapeso, duas, três ou múltiplas pás, que são geralmente de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.

2.1.2. Componentes das turbinas eólicas

Na Figura 7 é possível analisar os componentes que formam o aerogerador, desde o rotor formado pelas pás até a parte do gerador, que converte a enérgica mecânica em energia elétrica.

Figura 7. Componentes de um aerogerador



Fonte: www.aneel.gov.br (2015).

O rotor da turbina eólica tem como função captar a energia cinética contida no vento e transformar em energia mecânica, o mesmo é formado basicamente pelas pás e pelo cubo.

“As pás são os perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte da sua energia cinética em trabalho mecânico e transmitindo-a ao cubo. Inicialmente eram fabricadas em alumínio, sendo atualmente fabricadas em poliéster e fibra de vidro reforçadas com resinas epóxi.” (MAIA, 2012).

O cubo é uma estrutura metálica que fica à frente do aerogerador, onde é fixado as pás do rotor, constituído em aço ou liga de alta resistência. Outro item da turbina eólica é o eixo principal, que se conecta ao rotor e transfere a energia mecânica até a caixa multiplicadora, ou multiplicador de velocidades. O rotor e o eixo principal rotacionam em uma baixa velocidade, entre 15 e 60 rpm, porém com elevado momento torsor.

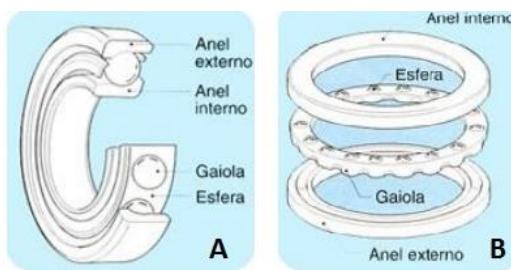
A caixa de velocidades é formada por um conjunto de engrenagens que tem a função de multiplicar a rotação de entrada, introduzida pelo eixo primário, e resultando numa rotação bem maior em um eixo menor, o eixo secundário. O segundo eixo do rotor rotaciona entre 1000 e 3000 rpm, com um baixo momento torsor, e é acoplado ao gerador.

2.2. Rolamentos

O rolamento é um dispositivo utilizado para substituir a fricção de deslizamento entre as superfícies, permitindo o movimento relativo entre duas ou mais partes. No aerogerador o rolamento atua no eixo primário, que é conectado ao rotor, com uma baixa rotação e elevado torque, auxiliando no suporte da carga, já no eixo secundário o rolamento cooperando no suporte da carga, que é conectado ao gerador.

Basicamente os rolamentos são formados por um anel externo (anel maior com a pista externa), um anel interno (anel menor com a pista interna), elementos rolantes (esferas ou rolos que estão contidos no espaço entre a pista externa e pista interna) e gaiola (usada para fixar a posição dos elementos rolantes).

Figura 8. Componentes de um rolamento



Fonte: www.madeira.ufpr.br (2015).

Como demonstrado na Figura 8, é possível ver os componentes do rolamento radial (A) e do rolamento axial (B).

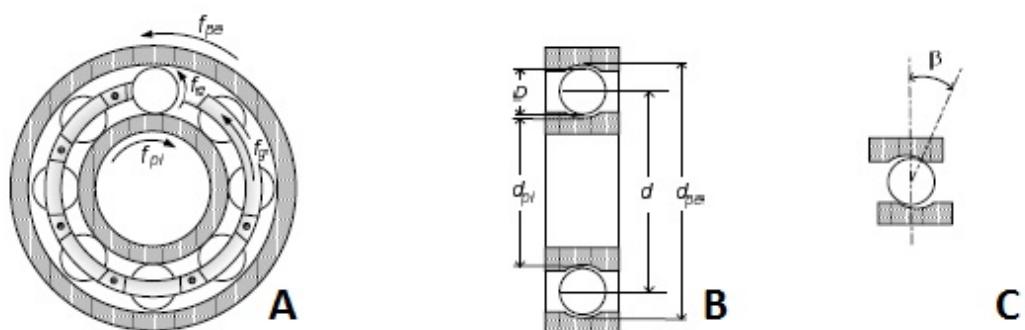
2.2.1. Frequências características de falhas em rolamentos

De acordo com Ponci (2005), as frequências características de falha dos rolamentos possuem um aspecto específico, elas são assíncronas, ou seja, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo.

Quando uma superfície com defeito de um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento é provocado um impulso através do choque excitando ressonâncias no rolamento e na máquina. Estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, na pista externa ou no elemento girante (MCFADDEN, 1984).

É necessário conhecer algumas especificações do rolamento para encontrar a frequência característica de cada componente, é possível ver os dados necessários do rolamento na Figura 9.

Figura 9. Frequências, dimensões e ângulo de contato do rolamento



Fonte: BEZERRA (2004).

Na Figura 9, tem-se as frequências dos elementos do rolamento (A), dimensões do rolamento (B) e ângulo de contato (C).

Onde as frequências da Figura 9 (A) representam:

f_{pi} = frequência da pista interna;

f_{pe} = frequência da pista externa;

f_e = frequência das esferas;

f_g = frequência da gaiola.

E as dimensões da Figura 9 (B) e (C) representam:

D = diâmetro da esfera;

d_{pi} = diâmetro da pista interna;

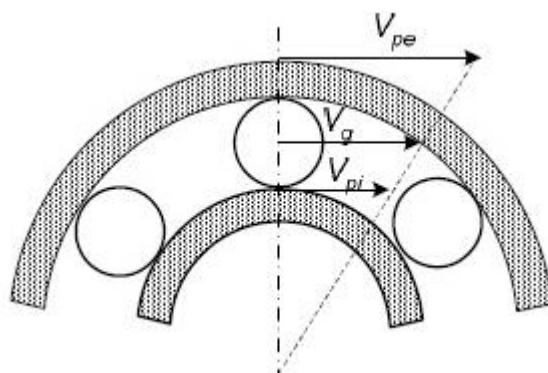
d_{pe} = diâmetro da pista externa;

d = diâmetro primitivo;

β = ângulo de contato.

Com as velocidades tangenciais dos elementos é possível obter as velocidades de rotação dos elementos do rolamento, como na Figura 10.

Figura 10. Velocidades dos elementos do rolamento



Fonte: BEZERRA (2004).

Onde as velocidades na Figura 10, representam:

V_g = velocidade da gaiola;

V_{pe} = velocidade da pista externa;

V_{pi} = velocidade da pista interna.

2.2.1.1. Frequência característica da gaiola

Analisando cinematicamente os elementos da Figura 10, é obtido:

$$V_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{2} \quad (2.1)$$

Sabendo que a frequência da gaiola é obtida por:

$$f_g = \frac{2V_g}{d} \quad (2.2)$$

Substituindo a Equação (2.1) na Equação (2.2) resulta em:

$$f_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{d} \quad (2.3)$$

Com as velocidades sendo determinadas em:

$$V_{pi} = \frac{d_{pi}f_{pi}}{2} \quad e \quad V_{pe} = \frac{d_{pe}f_{pe}}{2} \quad (2.4)$$

Substituindo a Equação (2.4) na Equação (2.3), tem-se:

$$f_g = \frac{d_{pi}f_{pi} + d_{pe}f_{pe}}{2d} \quad (2.5)$$

Considerando o ângulo de contato diferente de zero, tem-se:

$$d_{pi} = d - D\cos\beta \quad e \quad d_{pe} = d + D\cos\beta \quad (2.6)$$

Substituindo a Equação (2.6) na Equação (2.5), obtém-se:

$$f_g = \frac{1}{2d} \left((d - D\cos\beta)f_{pi} + (d + D\cos\beta)f_{pe} \right) \quad (2.7)$$

Sendo possível encontrar a frequência característica da gaiola através dos

diâmetros e frequência demonstrados na Figura 9.

2.2.1.2. Frequência característica da pista interna

De acordo com Bezerra (2004) a frequência característica da pista interna é obtida quando a esfera passa pelo defeito, dessa forma a frequência é resultado do número de esferas multiplicado pela frequência relativa da gaiola e pista interna.

$$f_{dpi} = N_e |f_g - f_{pi}| \quad (2.8)$$

Substituindo a Equação (2.7) na Equação (2.8), tem-se:

$$f_{dpi} = N_e \left| \frac{1}{2d} \left((d - D\cos\beta)f_{pi} + (d + D\cos\beta)f_{pe} \right) - f_{pi} \right| \quad (2.9)$$

Dessa forma a frequência característica de defeito da pista interna é obtida na Equação (2.10):

$$f_{dpi} = \frac{N_e}{2d} [(f_{pe} - f_{pi})(d + D\cos\beta)] \quad (2.10)$$

2.2.1.3. Frequência característica da pista externa

Da mesma forma é obtida a frequência característica da pista externa, onde a frequência é dada pela multiplicação da frequência relativa da gaiola e pista externa com o número de esferas, ou seja:

$$f_{dpe} = N_e |f_g - f_{pe}| \quad (2.11)$$

Substituindo a Equação (2.7) na Equação (2.11), tem-se:

$$f_{dpe} = N_e \left| \frac{1}{2d} \left((d - D\cos\beta)f_{pi} + (d + D\cos\beta)f_{pe} \right) - f_{pe} \right| \quad (2.12)$$

Dessa forma a frequência característica de defeito da pista externa é obtida na Equação (2.13):

$$f_{dpe} = \frac{N_e}{2d} [(f_{pi} - f_{pe})(d - D\cos\beta)] \quad (2.13)$$

2.2.1.4. Frequência característica nas esferas

Para obter a frequência da esfera, é necessário ver a Equação (2.14):

$$f_{de}D = f_{pi}d_{pi} = f_{pe}d_{pe} \quad (2.14)$$

Rearranjando a Equação (2.14) é possível obter a frequência de defeito nas esferas:

$$f_{de} = \frac{d}{2D} [(f_{pi} - f_{pe}) \left(1 - \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d} \right)] \quad (2.15)$$

Segundo Bezerra (2004), a frequência de defeito na esfera pode sofrer alterações ou não aparecer em alguns casos, por ter seu caráter não determinístico.

2.3. Técnicas de detecção de falhas em rolamentos

A detecção de falhas em rolamentos ocorre através da vibração dos componentes, dessa forma, é possível analisar os sinais de vibração quando o rolamento está em funcionamento, e através dessa análise é diagnosticado o defeito no rolamento.

Com o avanço da tecnologia as técnicas de análises foram aprimoradas, e já se tem diferentes formas de analisar os sinais. Esses métodos para detectar as falhas podem ocorrer em três tipos de domínios diferentes: domínio do tempo, frequência e métodos que utilizam a combinação tempo-frequência.

2.3.1. Domínio do tempo

Segundo TANDON e CHOUDHURY (1999) a medição regular dos fatores de crista e a medição dos níveis globais RMS (*Root Mean Square*) constituem a abordagem mais simples, no domínio do tempo, para avaliação de sinais de vibração, contudo demonstram um sucesso limitado.

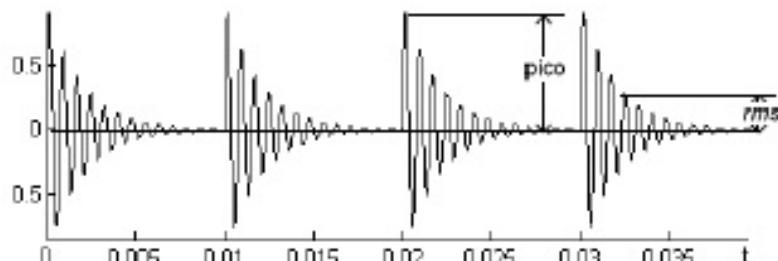
A medição os níveis globais RMS fornece as vibrações aumentando somente nos estágios finais, dessa forma o atrasa o resultado do diagnóstico. Além disso, essa técnica só fornece que há indícios do aumento de vibração no rolamento, porém não fornece informações sobre a localização dos defeitos.

“O Fator de Crista consiste na razão entre o nível de pico da vibração e o nível do valor RMS, medidos em uma banda de frequência. No momento em que o rolamento sofre um dano, ocorre uma elevação mais acentuada no nível de aceleração em comparação ao nível RMS. Dessa forma, calculando-se a razão dessa diferença de níveis e comparando-a com valores previamente estabelecidos para patamares de ocorrência de defeitos, é possível realizar uma avaliação das condições do rolamento. Em condições de vibração normal, livre de defeitos, o fator de crista permanece em baixos patamares, com valores variando de 2 a 6. No entanto, o surgimento e evolução de falhas promove um aumento nos mesmos, atingindo valores superiores a 6. No entanto, à medida que as falhas se propagam pela superfície do rolamento, os picos discretos desaparecem e o nível RMS se eleva, reduzindo o valor do fator de crista. Essa redução pode ser utilizada como um indício sintomático da ocorrência de falhas distribuídas, o que pode revelar a necessidade de reparos no rolamento.” (CASTILHO, 2013).

O fator crista (F_{cr}) é dado pela razão entre o valor de pico (X_{pico}) pelo valor de nível global RMS (X_{rms}), como demonstrado na Equação (2.16):

$$F_{cr} = \frac{X_{pico}}{X_{rms}} \quad (2.16)$$

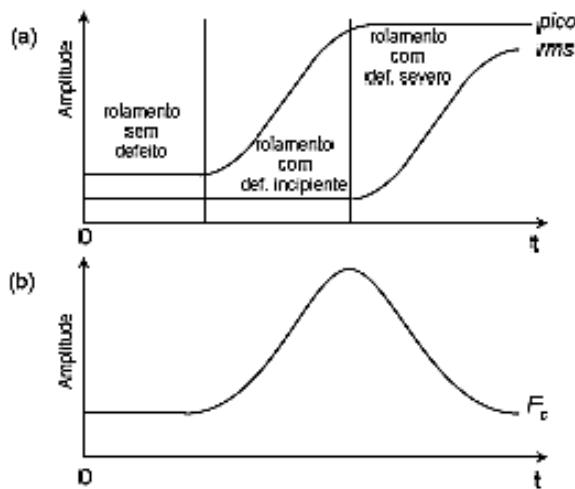
Figura 11. Pico e valor de rms para um rolamento com defeito



Fonte: BEZERRA (2004).

Observando a Figura 11, é possível analisar um sinal com defeito na pista estacionária de um rolamento, e com o surgimento de uma pequena falha, o valor de X_{pico} cresce mais que o X_{rms} resultando assim num maior valor de Fcr.

Figura 12. (a) Pico e valor de rms (b) fator de crista



Fonte: BEZERRA (2004).

Segundo Bezerra (2004), analisando a Figura 12 (a) é observado que com o surgimento de um defeito incipiente no rolamento, o valor de X_{pico} cresce bem mais que o valor de X_{rms} , resultando num crescimento do fator de crista, demonstrado na Figura 12 (b). Todavia, com o surgimento de um defeito severo no rolamento, o valor de X_{rms} cresce mais que o valor de X_{pico} , resultando numa redução do fator de crista. Dessa forma o Fcr não é um bom indicador de falhas em um estágio de falha severa.

2.3.2. Domínio da frequência

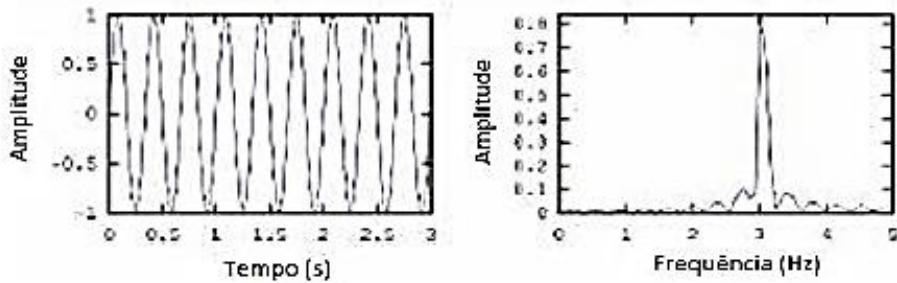
As técnicas de identificação de frequência possibilitam verificar o surgimento e a localização das falhas nos rolamentos, diferentemente das técnicas de identificação

do domínio de tempo, que só verificam se há falhas no rolamento. Contudo nem toda técnica que utiliza o domínio de frequência possibilita identificar o tipo de falha.

Segundo Castilho (2013), com a utilização da **Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT)**, o trabalho de obtenção de bandas espetrais tornou-se mais eficiente. O objetivo de se utilizar a FFT na análise de sinais é permitir a mudança em um sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência, reduzindo o excesso de informação contido no gráfico de domínio de tempo. Esse excesso ocorre, pois no gráfico no domínio de tempo há diversas amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo, dessa forma, há uma superposição de diferentes amplitudes oriundas de ressonâncias excitadas nos componentes do mancal, e através da mudança para o domínio de frequência o sinal é filtrado evitando a repetição e superposição das amplitudes.

É possível analisar uma aplicação da mudança de domínio na Figura 13, no qual é aplicado FFT num sinal senoidal de amplitude 1 e frequência 3 Hz, demonstrando a concentração em torno da frequência fundamental do sinal. A transformada de Fourier é diferente da FFT, pois a FFT possui menor complexidade, envolvendo um menor esforço computacional para sua resolução.

Figura 13. Aplicação da FFT em um sinal



Fonte: CASTILHO (2013).

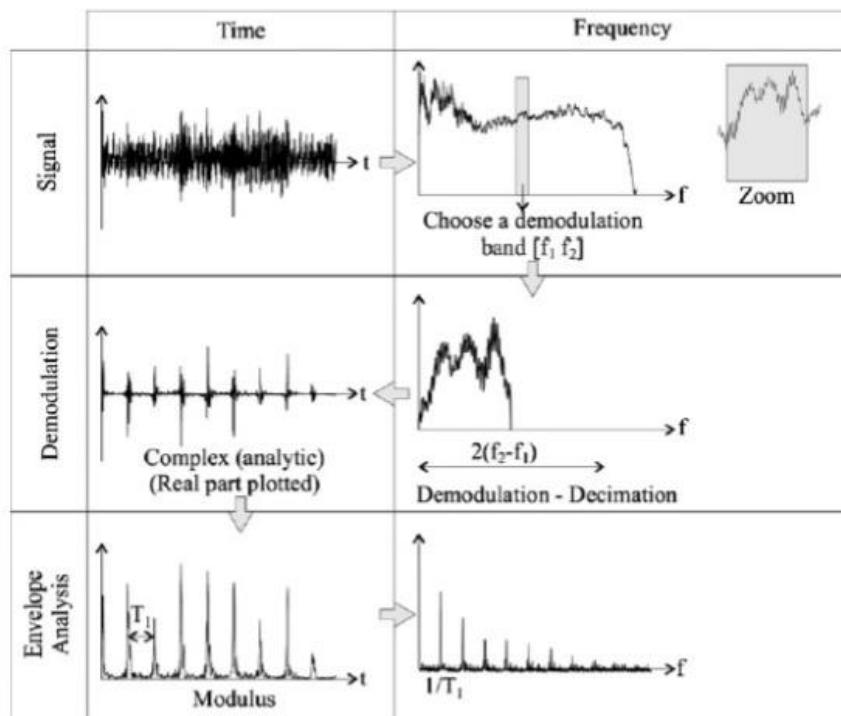
Segundo RANDALL et al (2011), os componentes de vibração podem modificar o espectro de frequências que está sendo analisado, mesmo após a utilização do FFT, dessa forma é limitado a resolução do gráfico da FFT complicando a interpretação do sinal. Para a solução desse problema, é utilizada a **análise de envelope**, que tem como objetivo a troca de análise de frequências com uma ampla faixa de frequências portadoras para uma faixa menor de frequências de falhas, permitindo assim sua análise com boa resolução.

De acordo com Castilho (2013), a utilização dessa técnica segue os seguintes passos:

- i) Mudança de domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da FFT
- ii) Filtragem do sinal por meio de um filtro passa-banda em torno de uma frequência de falha ou de alterações indicadas a partir da observação do gráfico da FFT.
- iii) Demodulação para eliminar os componentes de alta energia, permitindo uma detecção mais precisa dos defeitos do rolamento. Essa demodulação pode ocorrer em duas abordagens: a) construção de um sinal analítico complexo, no domínio do tempo, por meio da transformada de Hilbert, no qual a parte imaginária é a transformada de Hilbert da parte real; b) retificação do sinal por meio de um filtro passa-baixa, eliminando a frequência portadora.
- iv) Cálculo do espectro do sinal do envelope, obtendo em módulo a envoltória das amplitudes do gráfico obtido com a demodulação.
- v) Utilização da FFT, modificando do domínio de tempo para o domínio de frequência, possibilitando a extração das frequências características de falha do mancal.

Na Figura 14 é demonstrada a metodologia utilizada na análise de envelope utilizando a Transformada de Hilbert.

Figura 14. Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert



Fonte: CASTILHO (2013).

2.3.3. Domínio do tempo-frequência

A análise de sinais quando utilizada para sistemas no qual a aquisição de sinais é realizada em velocidades constantes, pode ser realizada no domínio da frequência, pois não há componentes variando com o tempo, componentes estacionárias. Para esses casos podem ser realizadas a FFT para analisar o sinal, porém em uma situação mais complexa, no qual surgem componentes não estacionárias no sinal é necessário um novo domínio para realizar a análise nesses sinais transientes, por isso é utilizado o domínio do tempo-frequência. Os métodos mais utilizados nesse domínio são a Distribuição de Wigner-Ville (WVD), Transformada de Wavelet e a Transformada de Gabor (STFT).

A **Short Time Fourier Transform (STFT)** é uma ferramenta utilizada na análise de sinais transientes, segundo Da Penha (1999) é uma adaptação temporal da análise espectral clássica de Fourier, possibilitando dessa forma a análise de sinal no domínio tempo-frequência.

De acordo com Araujo (2012), no ano de 1946, Dennis Gabor, engenheiro elétrico húngaro-britânico questionou como expressaria o termo de mudança de

frequências se a mesma é definida como algo infinito, seu questionamento foi uma resposta natural a necessidade de analisar sinais não-estacionários e o levou a uma formulação da primeira técnica de análise de sinal simultânea no tempo e frequência. A técnica de Gabor veio acompanhada por um princípio que discutia as limitações da análise de sinais não-estacionários. O *Princípio da Incerteza de Gabor-Heisenberg*, estabelece que é possível fazer correspondências entre os intervalos de tempo de uma função e as faixas de frequências presentes. Todavia, a diminuição do intervalo de tempo, reflete a uma maior incerteza no domínio da frequência.

A técnica denominada Transformada de Gabor ou STFT (*Short Time Fourier Transform*) utiliza ondas de curta duração, adicionando uma função Gaussiana na integral de Fourier, visto que a Transformada de Fourier decompõe o sinal em ondas senoidais de duração infinita, resultando em uma resolução no domínio de tempo nula. De acordo com Oliveira (2007), a STFT pode ser interpretada como uma janela deslizante de tamanho fixo que percorre o sinal, definindo intervalos a serem processados por uma “Transformada de Fourier Local”. A dificuldade encontrada neste tipo de análise é escolher o tamanho da janela.

Sobre a utilização do janelamento na STFT são utilizadas janelas gaussianas e não retangulares devido a descontinuidade entre duas janelas consecutivas que causa distorções no domínio tempo-frequência.

“O fato é que a descontinuidade entre duas janelas consecutivas causa distorções no domínio frequência. Usar a função gaussiana é uma estratégia para aproximar ou, até mesmo, igualar as laterais dos trechos a zero. Entre as funções utilizadas no janelamento, a que apresenta os piores resultados é justamente a janela retangular. As funções de janelamento mais conhecidas são *Hanning*, *Hamming* e *Blackman*. ” (ARAUJO, 2012).

“O quadrado do STFT é chamado spectrograma STFT, e é a representação mais simples e utilizada de espectro dependente do tempo, a qual descreve de forma aproximada a distribuição de energia do sinal no domínio tempo frequência. Enquanto que a STFT é geralmente complexa, o spectrograma STFT é sempre real. ” (DA PENHA, 1999).

CAPÍTULO TRÊS: MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Desenvolvimento de bancada experimental

Para realizar a simulação de um aerogerador foi necessário o desenvolvimento de uma bancada no qual apresentasse características semelhantes, construindo assim um protótipo para a análise de falhas dos rolamentos da turbina eólica. Dessa forma cada peça utilizada na bancada passou por um critério para analisar sua semelhança em relação a turbina eólica.

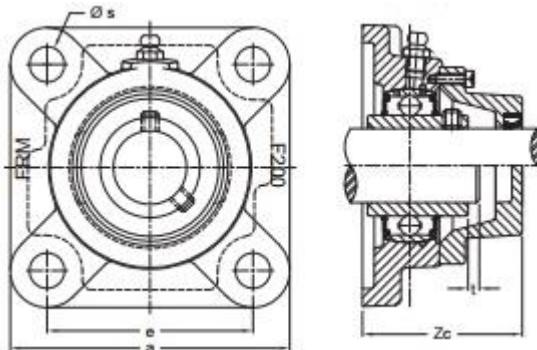
3.1.1. Critérios para seleção do eixo

Para a escolha do diâmetro principal, realizou-se um estudo do diâmetro do eixo principal do aerogerador e seu material. Segundo o projeto de aerogerador de Fundo (2014), o material utilizado no eixo é o aço AISI 4140, no seu projeto a turbina eólica pode gerar 1000 Watts e tem diâmetro do eixo principal próximo a 1 polegada.

3.1.2. Critérios para seleção do rolamento

Com a análise do projeto de aerogerador VAWT de 1000 Watts, foi verificada a utilização de rolamentos com mancal F205, apresentado na Figura 15. Através do catálogo de produtos da FRM (2010), foi possível obter informações sobre o rolamento utilizado, demonstrado na Tabela 1.

Figura 15. Mancal F205 para rolamento do aerogerador



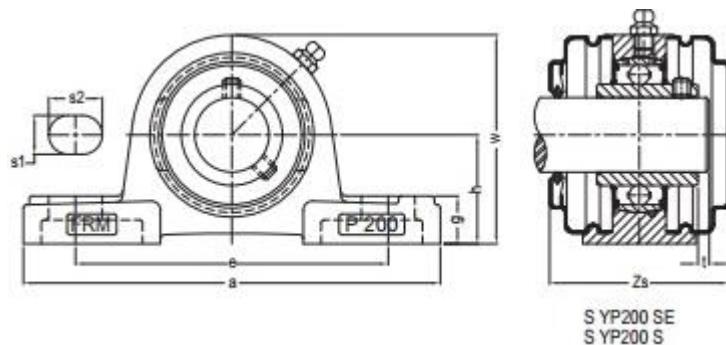
Fonte: Catálogo de produtos FRM (2010).

Tabela 1. Dimensões para os rolamentos de acordo com os mancais tipo F

Ø eixo mm pol	Caixa	Dimensão nominal (mm)										Paraf.	
		a	e	i	g	l	s	t	F(min.)	Zs	Zc	Ze	
12													
1/2													
15													
5/8	F 204 ⁿ	86	64,0	15,0	11	25	12,0	2	-	40	46	47,0	M10 3/8
17													
3/4													
20													
7/8													
15/16													
25													
1													
1-1/16													
1-1/8													
30													
1-3/16													
1-1/4													
1-1/4													
1-5/16													
1-3/8													
35													
1-7/16													
1-1/2													
40	F 208 ⁿ	130	102,0	21,0	15	36	16,0	3	46,0	62	66	70,5	M14 1/2
1-9/16													
1-5/8													
1-11/16	F 209 ⁿ	137	105,0	22,0	16	38	16,0	3	52,0	63	70	70,5	M14 1/2
1-3/4													
45													
1-13/16													
1-7/8													
1-15/16	F 210 ^o	143	111,0	22,0	16	40	16,0	3	57,0	65	72	74,5	M14 1/2
50													
2													
2-1/8													
55													
2-3/16	F 211 ⁿ	162	130,0	25,0	18	43	19,0	4	64,0	71	75	81,5	M16 5/8

Fonte: Catálogo de produtos FRM (2010).

Com a Tabela 1 é possível verificar que o diâmetro aproximado para 1 polegada é o F205, porém para melhor fixação na bancada foi utilizado o mancal P205, semelhante ao F205. Demonstrado na Figura 16.

Figura 16. Mancal P205 para rolamento do aerogerador

Fonte: Catálogo de produtos FRM (2010).

As características do mancal P205 estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Dimensões para os rolamentos de acordo com os mancais tipo P

Ø eixo mm pol	Caixa	Dimensão nominal (mm)												Paraf.
		h	a	e	b	s1	s2	g	w	t	Z_s	Z_c	Z_e	
12														
1/2														
15	P 203	30,2	127	95	38	13	19	16	62	-	-	-	-	M10 3/8
5/8														
17														
3/4	P 204 ⁿ	33,3	127	95	38	13	19	16	65	2	51	62	76	M10 3/8
20														
7/8														
15/16	P 205 ⁿ	36,5	140	105	38	13	18	16	70	2	57	70	78	M10 3/8
25														
1														
1-1/16														
1-1/8														
30	P 206 ⁿ	42,9	165	118	48	17	23	18	83	2	62	75	90	M14 1/2
1-3/16														
1-1/4														
1-1/4	P 207 ⁿ	47,6	167	127	48	17	21	19	94	3	72	80	92	M14 1/2
1-5/16														
1-3/8														
35														
1-7/16														
1-1/2	P 208 ⁿ	49,2	184	137	54	17	25	19	100	3	82	90	104	M14 1/2
40														
1-9/16														
1-5/8														
1-11/16	P 209 ⁿ	54,0	190	146	54	17	22	20	108	3	82	95	99	M14 1/2
1-3/4														
45														
1-13/16														
1-7/8														
1-15/16	P 210 ⁿ	57,2	206	159	60	20	25	22	114	3	87	100	105	M16 5/8
50														
2														
2														
2-1/8														
55	P 211 ⁿ	63,5	219	171	60	20	25	22	126	4	92	100	113	M16 5/8
2-3/16														

Fonte: Catálogo de produtos FRM (2010).

O mancal utilizado foi o P205, visto que o diâmetro do eixo é de 1 polegada, com rolamento UC205, Figura 17. O rolamento é do tipo radial e possui 9 esferas.

Figura 17. Rolamento UC 205

Fonte: Catálogo de produtos FRM (2010).

3.1.3. Critérios para seleção do motor

Para a simulação da turbina eólica é necessário uma baixa rotação e um elevado torque, por isso foi utilizado um motor eletrônico monofásico WEG com rotação de 1620 RPM e potência de 1/4 HP, no qual está acoplado a uma caixa redutora de velocidade. Apesar da caixa redutora, o eixo rotaciona a 80 RPM quando acoplado ao motor, por isso foi necessário reduzir ainda mais a rotação do eixo, pois o eixo primário do aerogerador rotaciona em uma velocidade entre 15 e 60 rpm. Para obter uma rotação semelhante a turbina eólica foi instalado um *dimmer*, demonstrado na Figura 18.

Figura 18. Dimmer

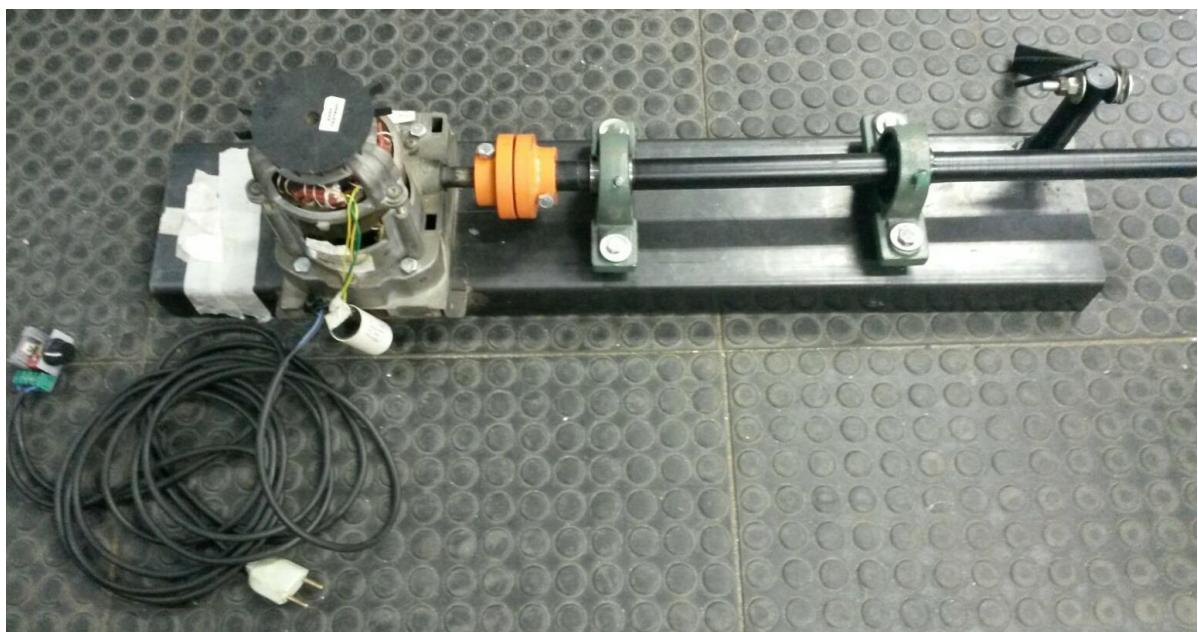


Fonte: Autor.

Com a utilização do *dimmer*, é possível controlar a potência utilizada pelo motor, dessa forma é possível reduzir a rotação, construindo assim um sinal transiente, pois o aerogerador é dependente da velocidade do vento e modifica constantemente a velocidade de rotação. Com o auxílio do *dimmer* é obtido uma redução da rotação de 80 RPM do motor utilizado para uma rotação que varia de 30 a 80 RPM, podendo variar a velocidade de rotação durante o ensaio utilizando o potenciômetro.

Devido a elevada vibração que motor transferia ao eixo, foi instalado um acoplamento para amortecer a vibração do motor, apresentado na Figura 19 situado na conexão do motor com o eixo na cor laranja.

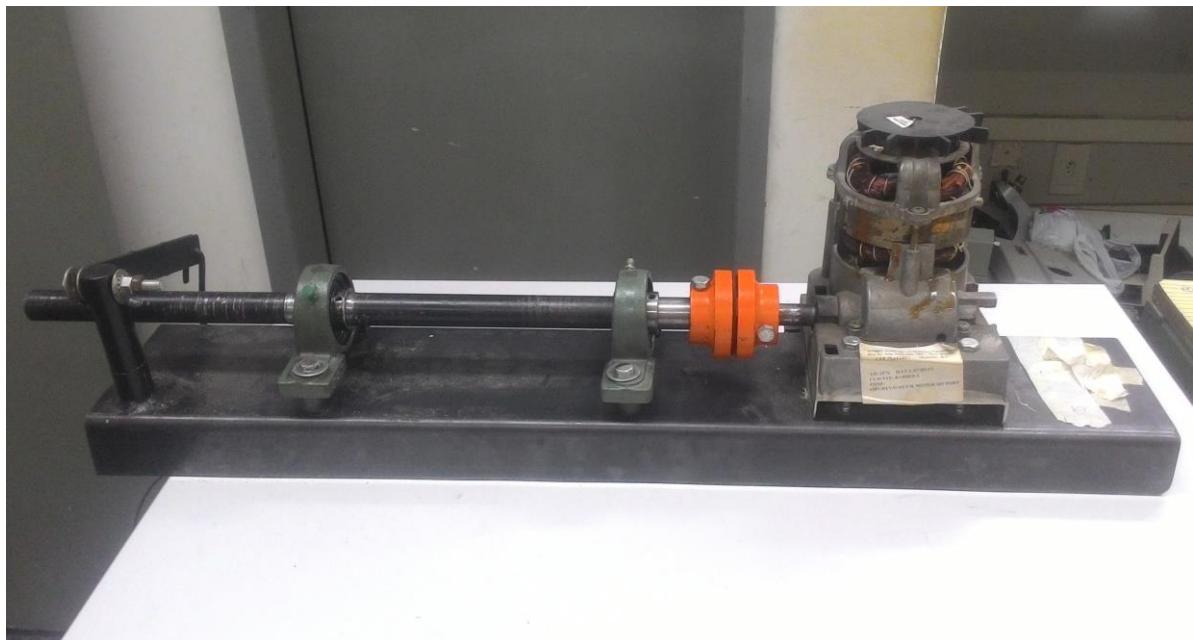
Figura 19. Bancada experimental para simulação do aerogerador



Fonte: Autor.

Ao final do eixo é aplicada uma carga através da haste soldada na base da bancada. Essa carga simula o peso do rotor da turbina eólica, observada na Figura 20.

Figura 20. Bancada experimental durante ensaio



Fonte: Autor.

3.2. Falhas nos rolamentos

Os rolamentos foram expostos a três situações distintas, ao primeiro rolamento foi adicionado soda cáustica (hidróxido de sódio) numa solução aquosa de concentração de 40% de NaOH, resultando numa oxidação do rolamento, apresentada na Figura 21.

Figura 21. Rolamento oxidado



Fonte: Autor.

O segundo rolamento foi contaminado com pequenas partículas de grãos de areia do tipo areia média, que passaram por uma peneira de malha 28, com abertura máxima para o tamanho de grão de 0,6 mm, apresentada na Figura 22, resultando em grãos de areia mais finos. Foram introduzidos 50 g de areia no rolamento.

Figura 22. Peneira (A) e grãos de areia (B)



Fonte: Autor.

Ao serem inseridos os grãos de areia no rolamento, homogeneizou-se com o lubrificante tornando grãos maiores, apresentado na Figura 23.

Figura 23. Rolamento com introdução de grãos de areia



Fonte: Autor.

No terceiro rolamento foi realizado um desgaste na pista externa do rolamento que pode ser observado na Figura 24. O desgaste foi realizado com o auxílio de ferramentas como chave de fenda.

Figura 24. Rolamento com desgaste na pista externa



Fonte: Autor.

3.3. Medição da vibração

As medições da vibração foram realizadas com um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, NI cDAQ-9132, observado na Figura 26, e módulo condicionador de sinais NI9234 com conversor analógico digital de 24 bits, apresentado na Figura 25.

Figura 25. Módulo condicionador de sinais NI9234



Fonte: Autor.

Figura 26. Sistema de aquisição de dados e módulo condicionador de sinais



Fonte: National Instruments

O acelerômetro utilizado nesse procedimento é da marca B&K e têm sensibilidade de 9,958 mV/g, apresentado na Figura 27.

Figura 27. Acelerômetro utilizado para captação do sinal



Fonte: Autor.

A severidade da vibração é definida em função do RMS do sinal da aceleração, velocidade ou deslocamento. O acelerômetro foi montado acima do mancal do rolamento, observado na Figura 28.

Figura 28. Acelerômetro montado na bancada



Fonte: Autor.

3.4. Medição da velocidade de rotação

As medições da velocidade de rotação do eixo foram realizadas através do uso do tacômetro Minipa modelo MDT 2238, sendo possível a análise através do contato mecânico ou sem contato, pelo método ótico. O tacômetro demonstrado na Figura 29 apresenta uma precisão de 0,05%, e tem sua faixa de medição de 0,5 a 19999 rpm.

Figura 29. Tacômetro Minipa MDT 2238

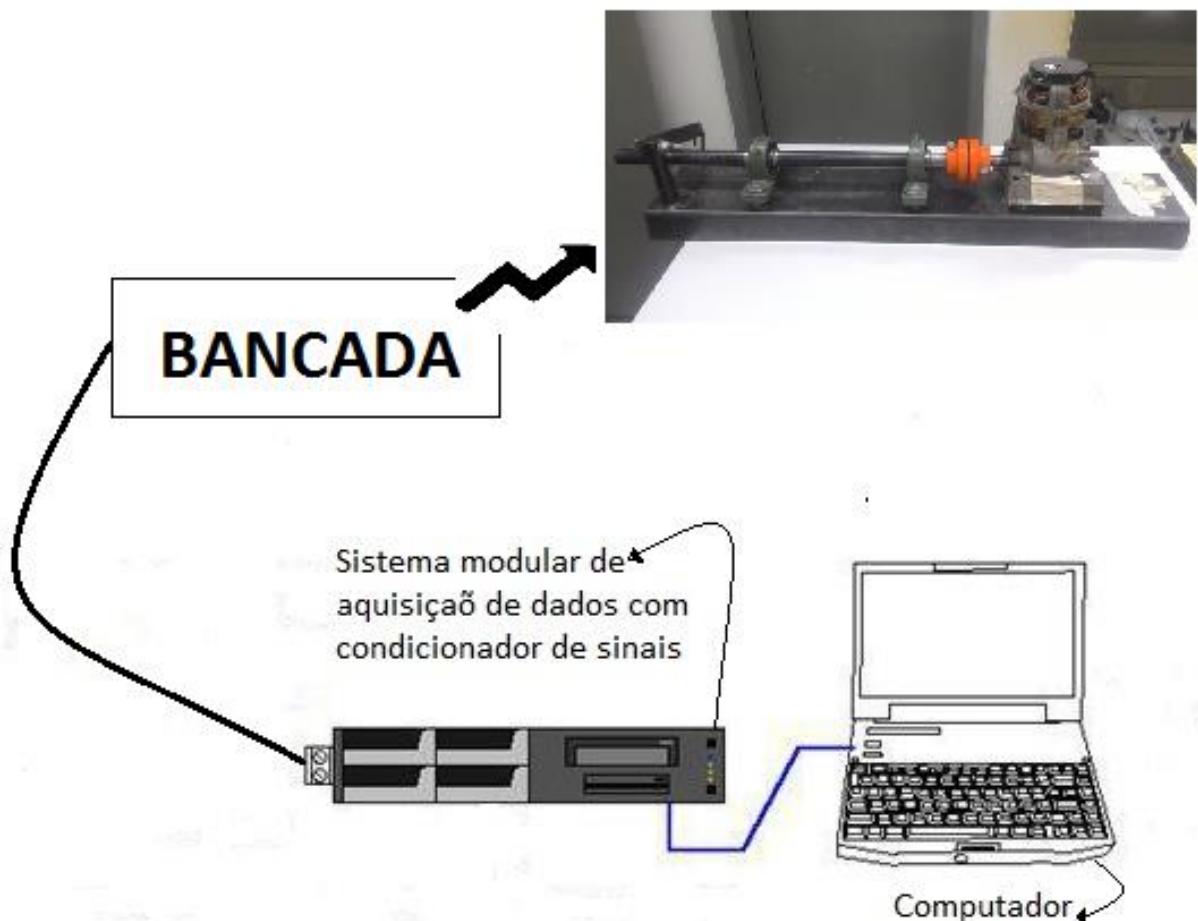


Fonte: Autor.

3.5. Esquema da bancada experimental

O experimento realizado pode ser observado na Figura 30, no qual é apresentado um esquema gráfico de medição utilizado para captar o sinal obtido no rolamento, no qual o acelerômetro esteve montado na parte superior do mancal do rolamento próximo a haste com a carga, visto na Figura 28.

Figura 30. Esquema gráfico da configuração de montagem do sistema de medição



Fonte: Autor.

3.6. Análise metalográfica do material

Realizou-se a análise metalográfica do material do eixo no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, no qual retirou uma amostra do material, aço AISI 4140 e fez o polimento de sua face, observado na Figura 31, para posteriormente ser introduzido uma solução de Nital 2% (solução de ácido nítrico com álcool etílico), atacando quimicamente o metal.

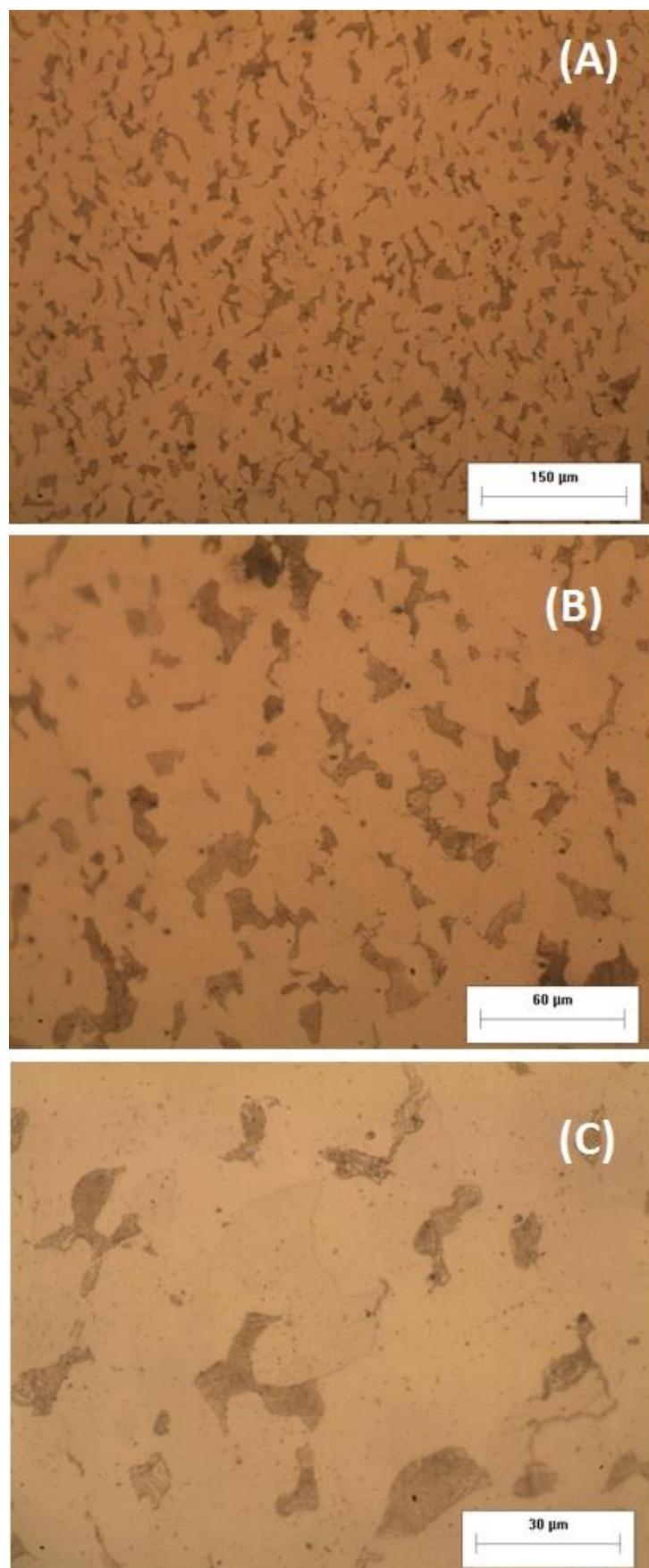
Figura 31. Amostra do material polido



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos na análise metalográfica do aço AISI 4140 podem ser observados na Figura 32, apresentando o zoom de 200x (A), o zoom de 500x (B) e o zoom de 1000x (C).

Figura 32. Análise metalográfica do aço AISI 4140 com zoom (A) 200x, (B) 500x, (C) 1000x



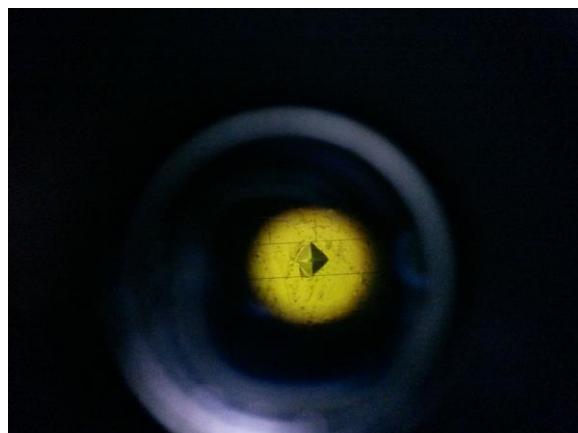
Fonte: Autor.

A microestrutura apresentada na Figura 32 obtida por microscopia ótica é formado por ferrita (área clara), formada por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa, e perlita (área escura), formada por uma mistura eutetóide de das fases, ferrita e cementita.

3.7. Ensaio de microdureza do material

Realizou-se o ensaio de microdureza Vickers no material do eixo no Laboratório de Tribologia e Dinâmica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, aplicando uma carga de 1,96 N com tempo de permanência de 15 s, resultando na indentação deixada na superfície do material, observada na Figura 33.

Figura 33. Endentação da microdureza Vickers



Fonte: Autor.

O resultado do teste de microdureza é observado na Figura 34, obtido através do microdurômetro digital que diferencia a distância entre as diagonais da indentação após a remoção da carga aplicada, constatando um valor de 193,8 HV.

Figura 34. Resultado obtido no teste de microdureza



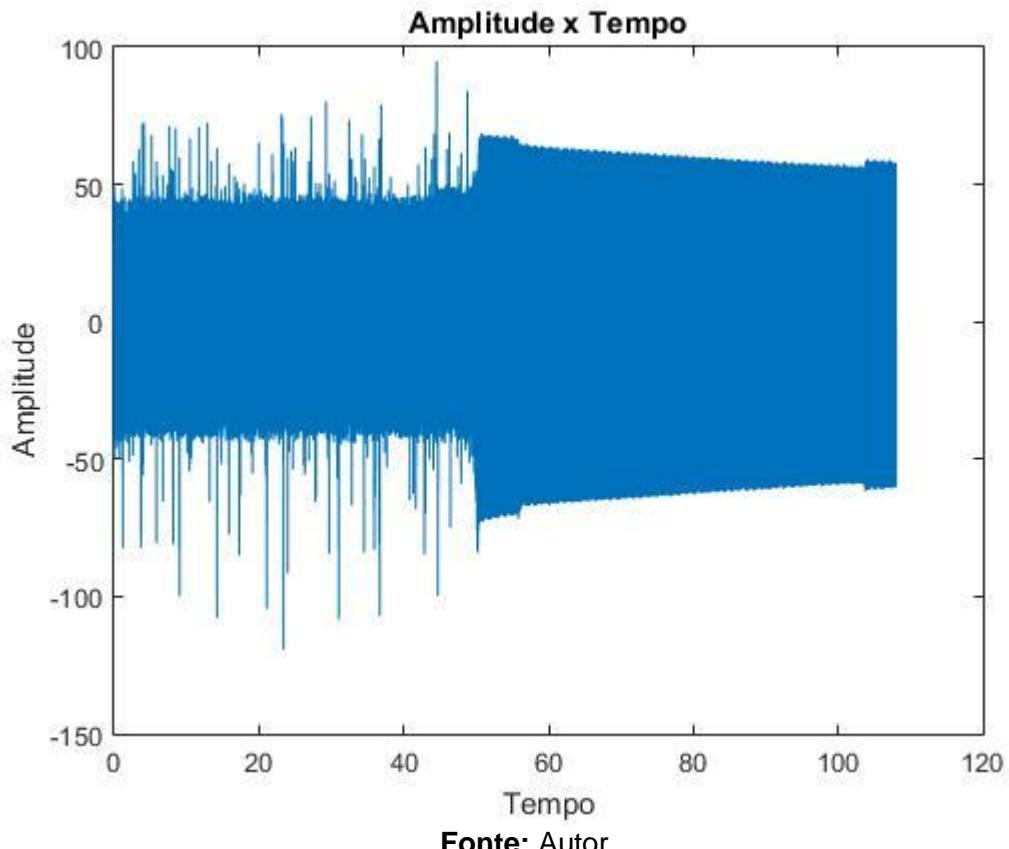
Fonte: Autor.

CAPÍTULO QUATRO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Rolamento sem defeito

Primeiramente foram realizados os ensaios com a bancada funcionando com os rolamentos sem defeitos, para analisar os sinais padrões da faixa de frequência do rolamento. Os sinais foram obtidos através do acelerômetro conectado ao computador com o auxílio do software *LabView*. O sinal foi captado com uma rotação inicial de 37 rpm, e após 51 segundos a rotação foi modificada para 54,5 rpm através do uso do *dimmer*, mantendo a rotação até 108 segundos, durante todo experimento foi aplicada uma carga na haste de 5800 g. Dessa forma foi possível simular as alterações do impacto do vento nas pás, formando um sinal transiente. A Figura 35 apresenta a amplitude do sinal versus tempo em segundos.

Figura 35. Sinal sem defeito amplitude x tempo

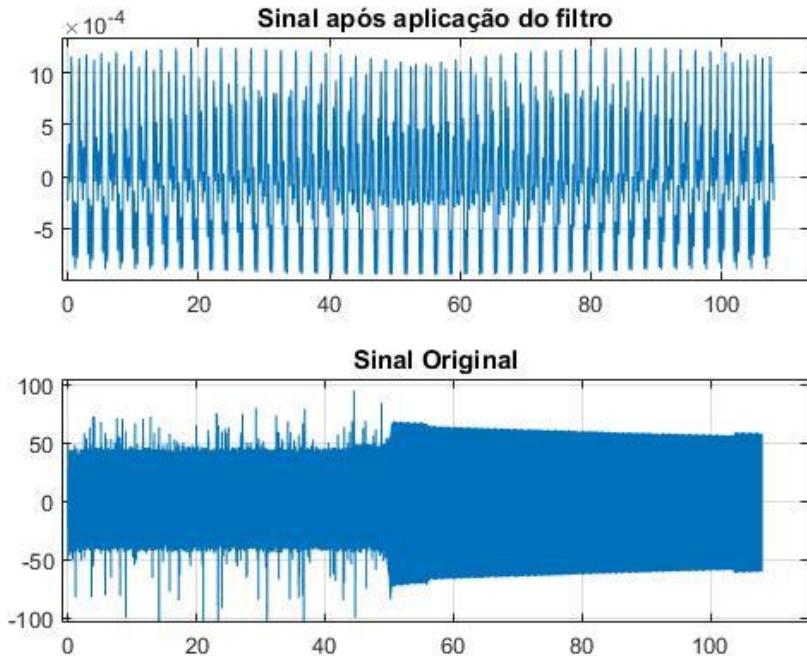


Fonte: Autor.

É possível verificar na Figura 35 que a amplitude do sinal se mantém baixo até a rotação ser ampliada, e ao final do ensaio quando aumentada a rotação, a amplitude é superior. O software utilizado para analisar o sinal foi o *MatLab*, e a taxa de amostragem (*sample rate*) utilizada foi 1300 pontos por segundo.

Com o objetivo de eliminar os ruídos é aplicado um filtro no sinal, apresentado na Figura 36.

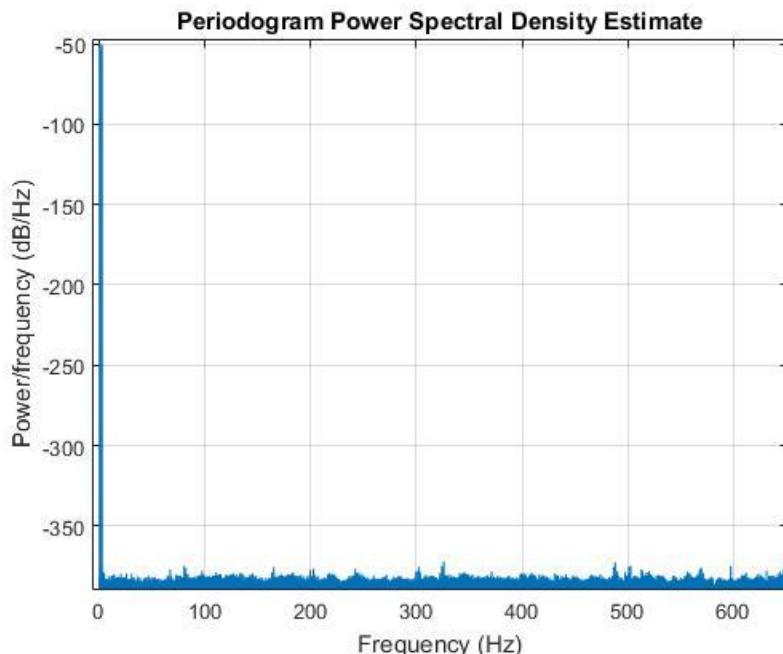
Figura 36. Sinal sem defeito com aplicação do filtro



Fonte: Autor.

Ao aplicar a PSD (apresentado no apêndice) no sinal filtrado, é obtida Figura 37, na qual é possível verificar as faixas de frequências do sistema.

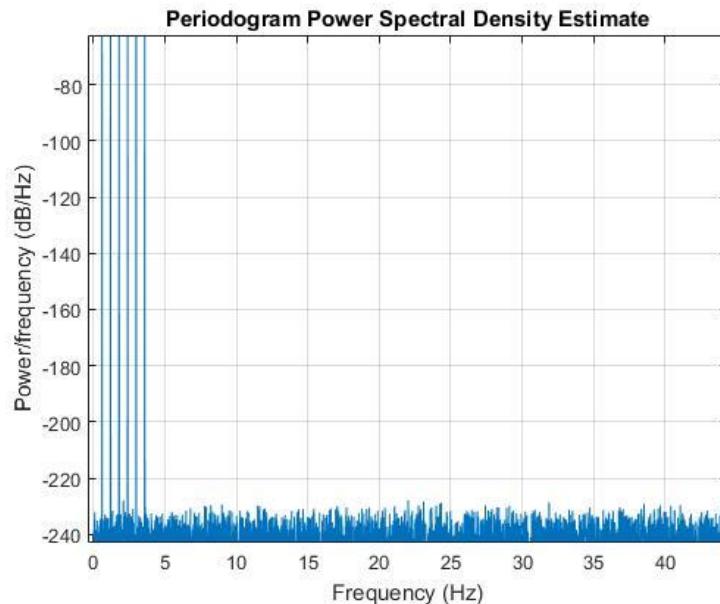
Figura 37. PSD do sinal do rolamento sem defeito



Fonte: Autor.

Analizando a Figura 37 são vistos alguns picos em baixa frequência, devido a baixa rotação do motor e somente ruídos ao longo do sinal. Aplicando um *zoom* no sinal após a PSD é obtido a Figura 38.

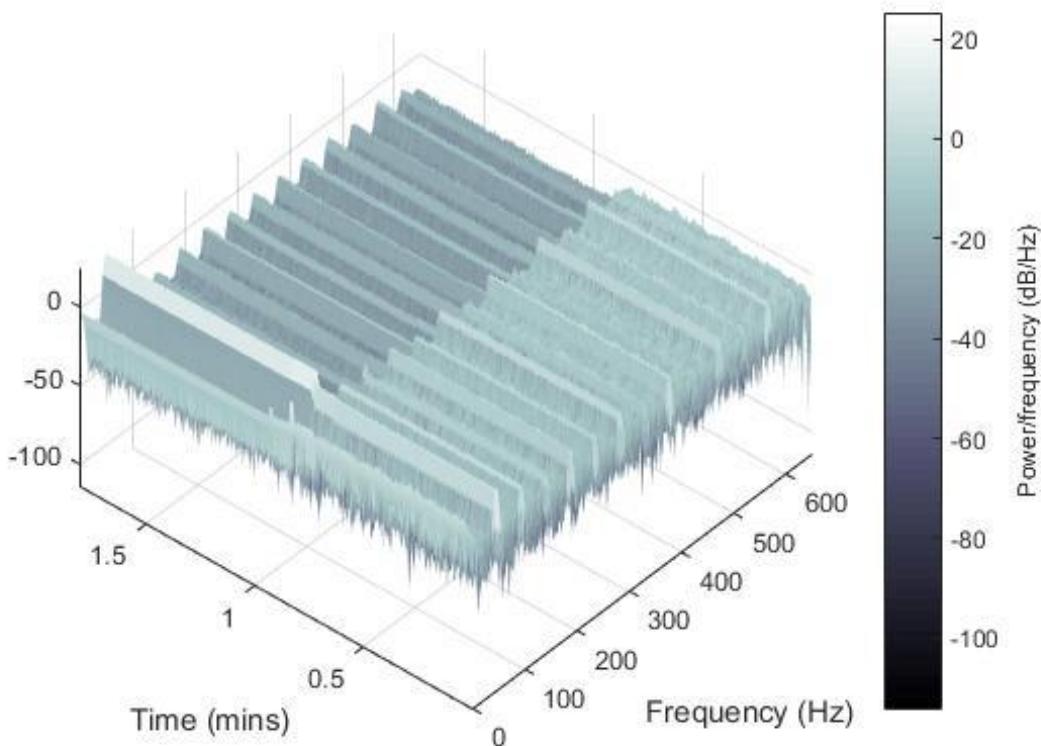
Figura 38. Aproximação do sinal após a PSD



Fonte: Autor.

Verificando a Figura 38, é percebido uma maior faixa de frequência em 0,63 Hz, caracterizando a frequência fundamental do rolamento, e nos seus harmônicos. Com a aplicação do filtro, foi eliminado com os ruídos a frequência de alimentação do sistema 60 Hz. Verificando na Figura 37 que não há nenhum pico de frequência irregular, é possível determinar que o rolamento não tem uma frequência que caracterize algum defeito. Aplicando uma técnica de análise no domínio tempo-frequência, STFT (*Short-time Fourier Transform*) no sinal obtido no ensaio é possível demonstrar o sinal composto pelo tempo, frequência e densidade espectral, representado na Figura 39.

Figura 39. Sinal após aplicação da STFT em três dimensões



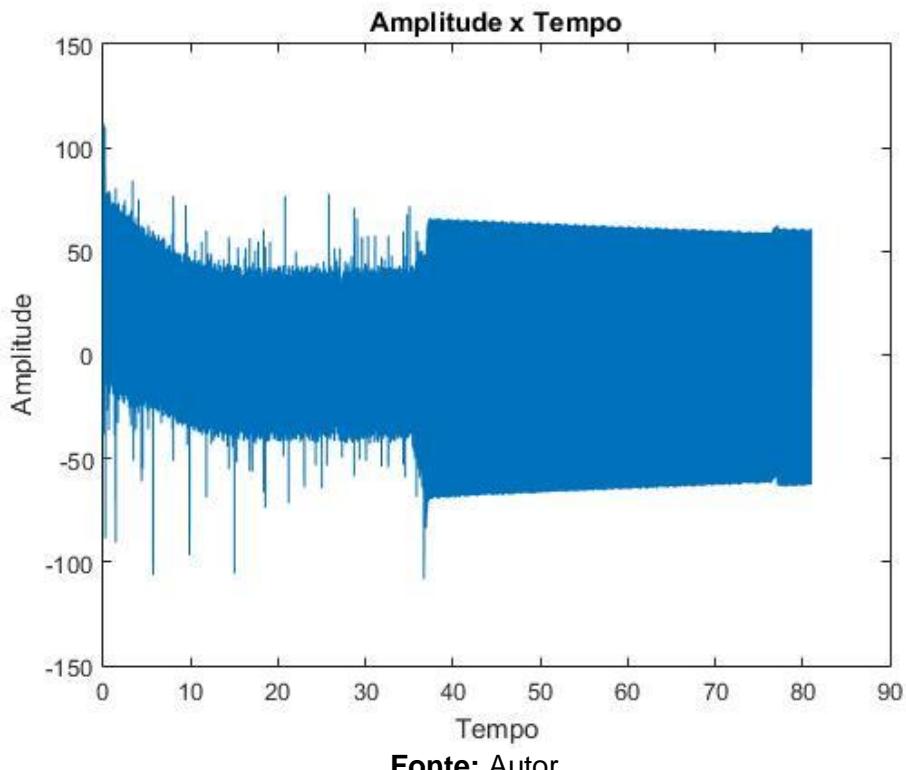
Fonte: Autor.

Na Figura 39, é verificada a mudança de rotação aos 51 segundos do ensaio, acompanhada da frequência analisada.

4.2. Rolamento com grãos de areia

O ensaio realizado com o rolamento com grãos de areia durou 82 segundos, no qual manteve uma rotação de 39,8 rpm do início até 37 s, aumentando sua rotação para 58,5 rpm até o final do ensaio. O sinal captado teve uma taxa de amostragem de 1300 pontos por segundo e foi aplicado uma carga na haste de 5800 g. A Figura 40 apresenta a amplitude do sinal versus tempo em segundos.

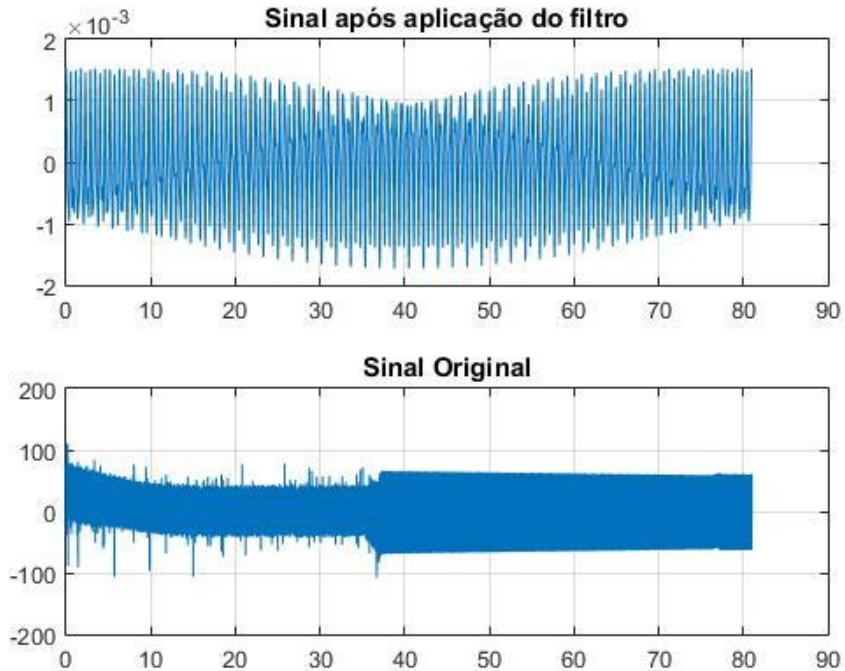
Figura 40. Sinal do rolamento com grãos de areia amplitude x tempo



Fonte: Autor.

Com o objetivo de eliminar os ruídos é aplicado um filtro no sinal, apresentado na Figura 41.

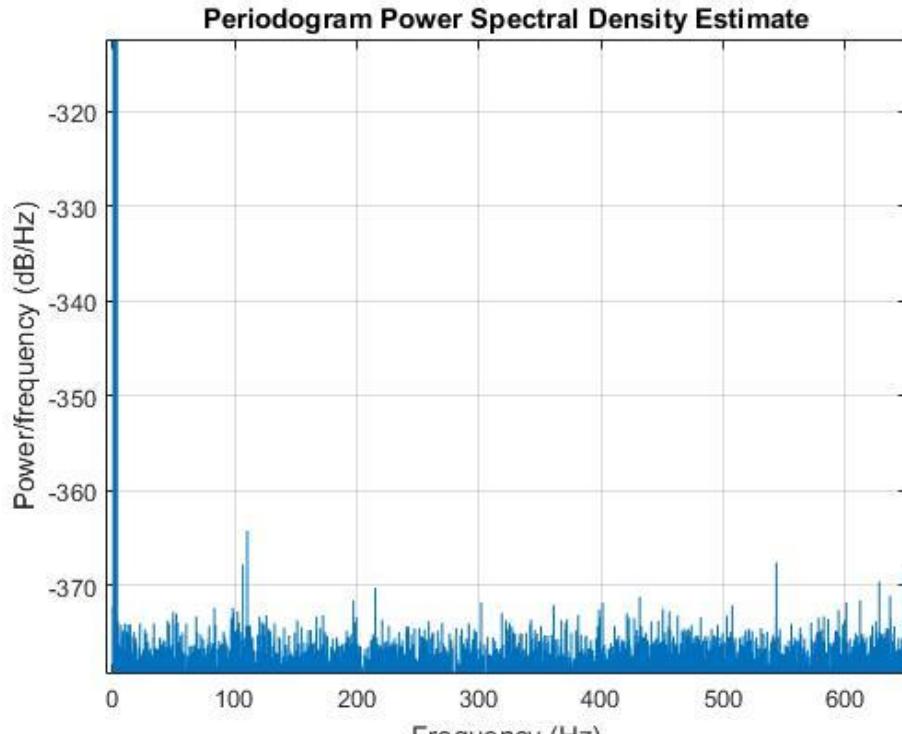
Figura 41. Sinal do rolamento com grãos de areia com aplicação do filtro



Fonte: Autor.

Ao aplicar a PSD no sinal filtrado é obtido um gráfico frequência versus densidade espectral, sendo possível analisar as faixas de frequência do sistema na Figura 42.

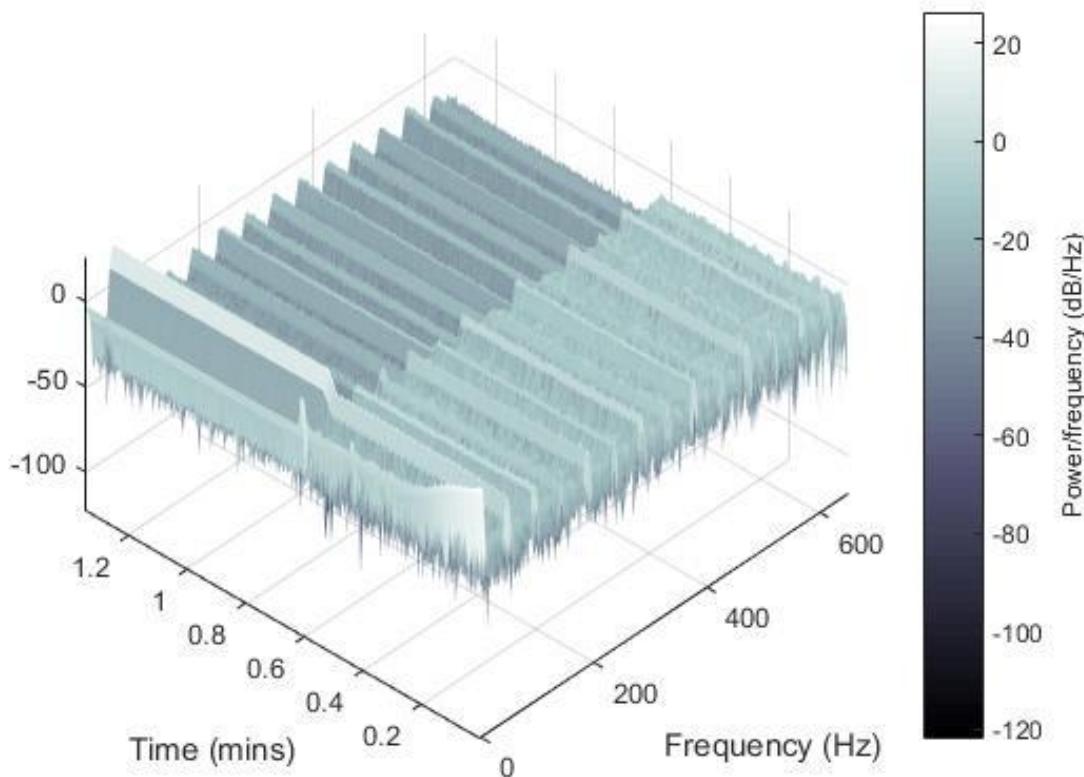
Figura 42. PSD do sinal do rolamento com grãos de areia



Fonte: Autor.

Verificando a Figura 42, é percebido uma maior faixa de frequência próxima a 1 Hz, caracterizando a frequência fundamental do rolamento e nos seus harmônicos. Com a aplicação do filtro, foi eliminado com os ruídos a frequência de alimentação do sistema 60 Hz, porém é observado um pico de frequência irregular em 108 Hz, e em seus harmônicos em 540 Hz caracterizando o defeito devido aos grãos de areia que foram introduzidos no rolamento. Aplicando uma técnica de análise no domínio tempo-frequência, STFT (*Short-time Fourier Transform*) no sinal obtido no ensaio é possível demonstrar o sinal composto pelo tempo, frequência e densidade espectral, representado na Figura 43.

Figura 43. Sinal com introdução de grãos de areia após aplicação da STFT em três dimensões



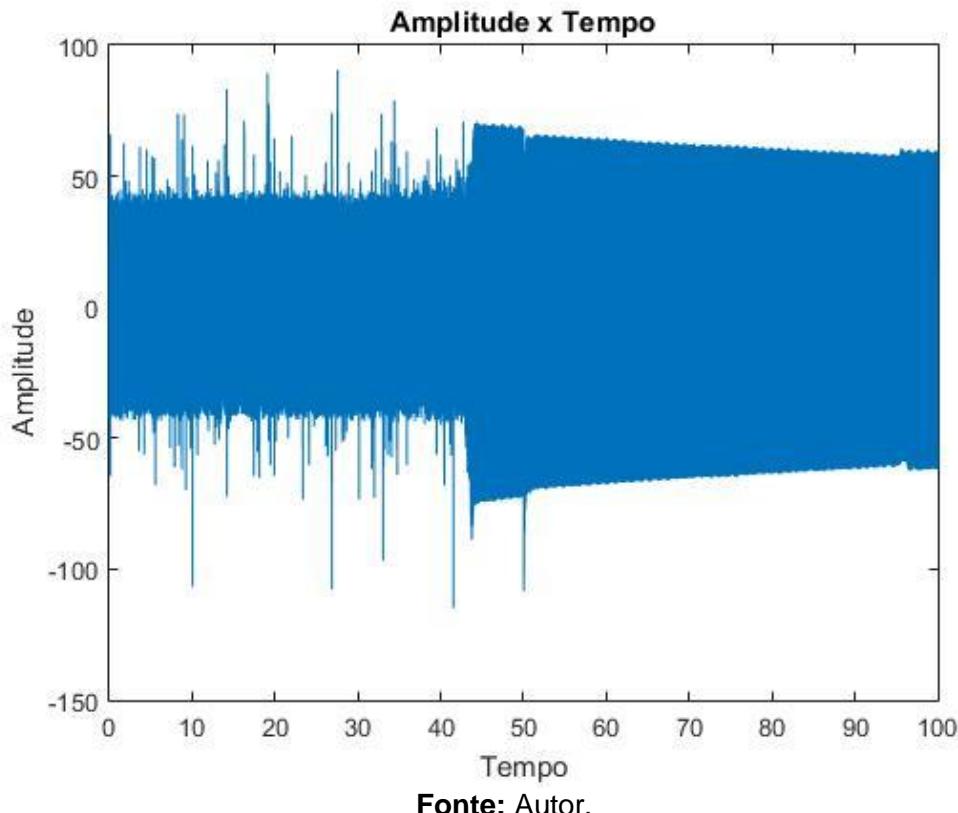
Fonte: Autor.

Na Figura 43, é verificada a mudança de rotação aos 37 segundos do ensaio, acompanhada da frequência analisada.

4.3. Rolamento com desgaste na pista externa

O ensaio realizado com o rolamento com desgaste na pista externa durou 100 segundos, no qual manteve uma rotação de 34,4 rpm do início até 42 segundos, aumentando sua rotação para 52,8 rpm até o final do ensaio. O sinal captado teve uma taxa de amostragem de 1300 pontos por segundo, e foi aplicado uma carga na haste de 5800 g. A Figura 44 apresenta a amplitude do sinal versus tempo em segundos.

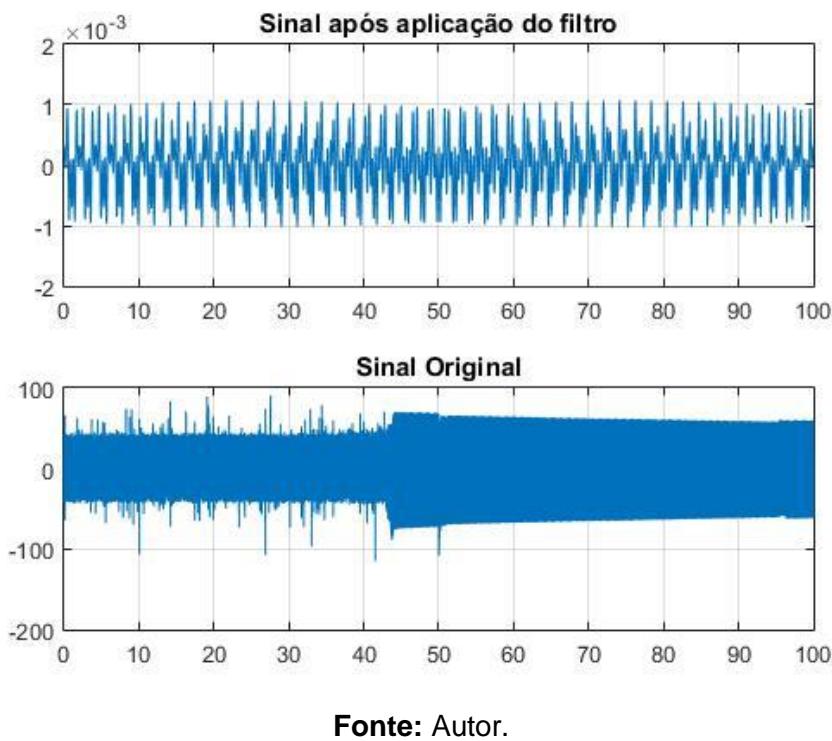
Figura 44. Sinal do rolamento com desgaste na pista externa amplitude x tempo



Fonte: Autor.

Com o objetivo de eliminar os ruídos é aplicado um filtro no sinal, apresentado na Figura 45.

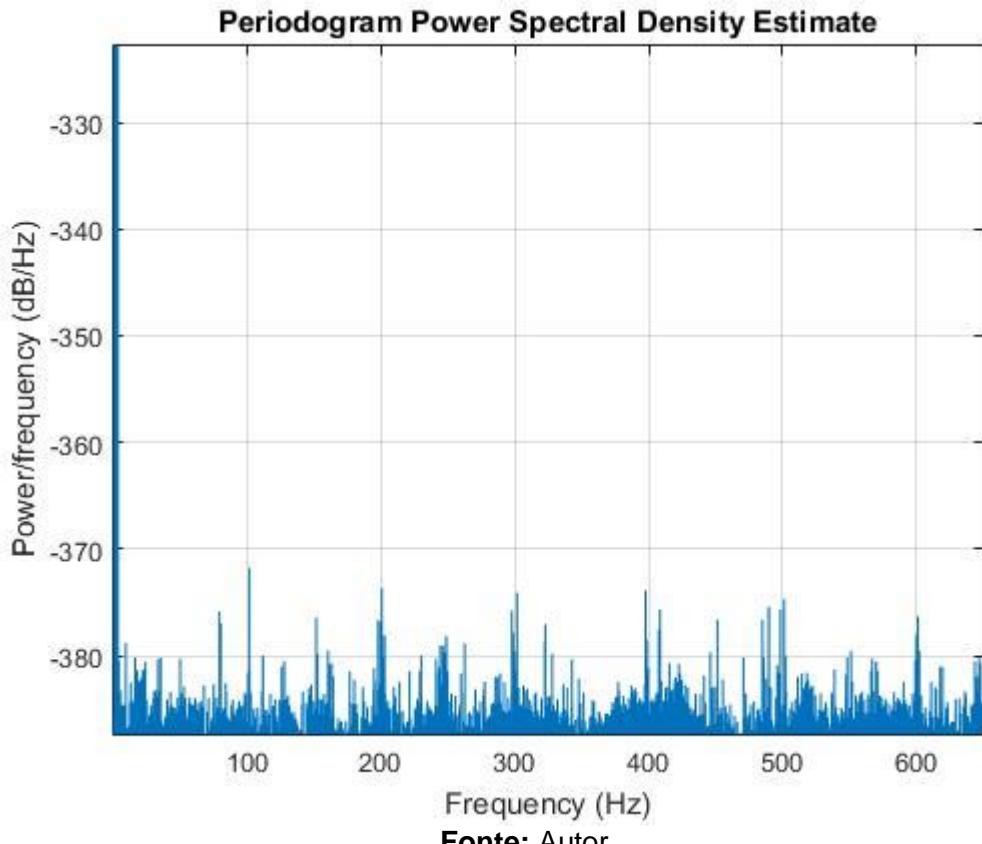
Figura 45. Sinal do rolamento com desgaste na pista externa com aplicação do filtro



Fonte: Autor.

Ao aplicar a PSD no sinal filtrado é obtido um gráfico frequência versus densidade espectral, sendo possível analisar as faixas de frequência do sistema na Figura 46.

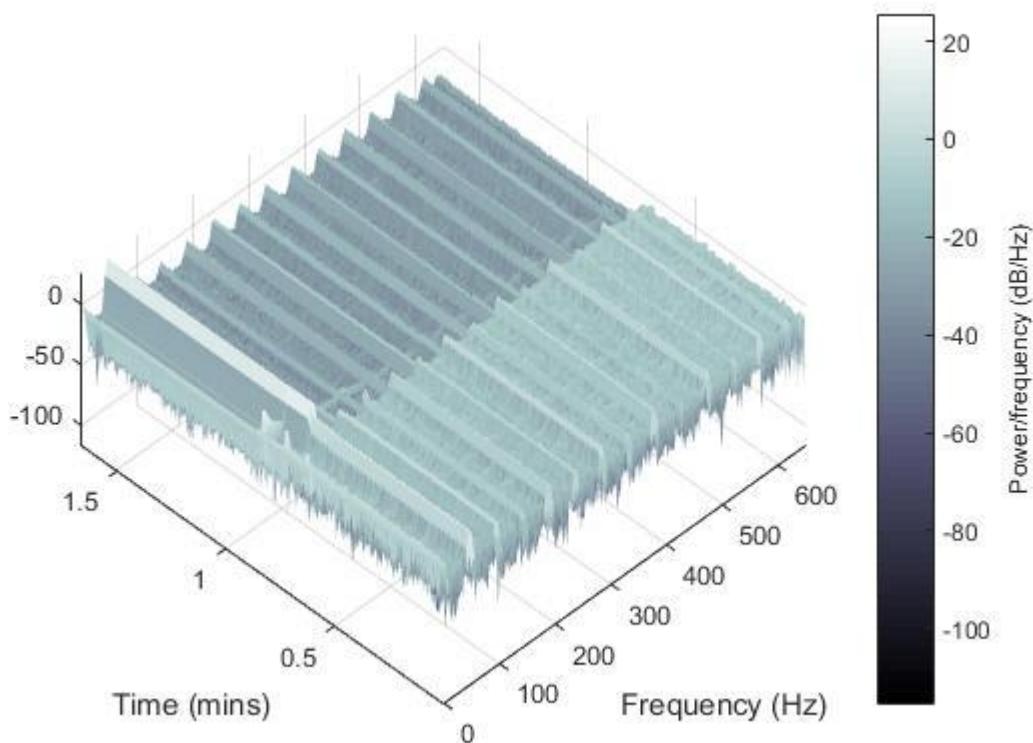
Figura 46. PSD do sinal do rolamento com desgaste na pista externa



Fonte: Autor.

Verificando a Figura 46, é percebido uma maior faixa de frequência próxima a 1 Hz, caracterizando a frequência fundamental do rolamento e nos seus harmônicos. Com a aplicação do filtro, foi eliminado com os ruídos a frequência de alimentação do sistema 60 Hz, porém é observado um pico de frequência irregular em 100 Hz e em seus harmônicos em 200 Hz a 600 Hz, sendo possível caracterizar o defeito na pista externa. Aplicando uma técnica de análise no domínio tempo-frequência, STFT (*Short-time Fourier Transform*) no sinal obtido no ensaio é possível demonstrar o sinal composto pelo tempo, frequência e densidade espectral, representado na Figura 47.

Figura 47. Sinal com degaste na pista externa após aplicação da STFT em três dimensões



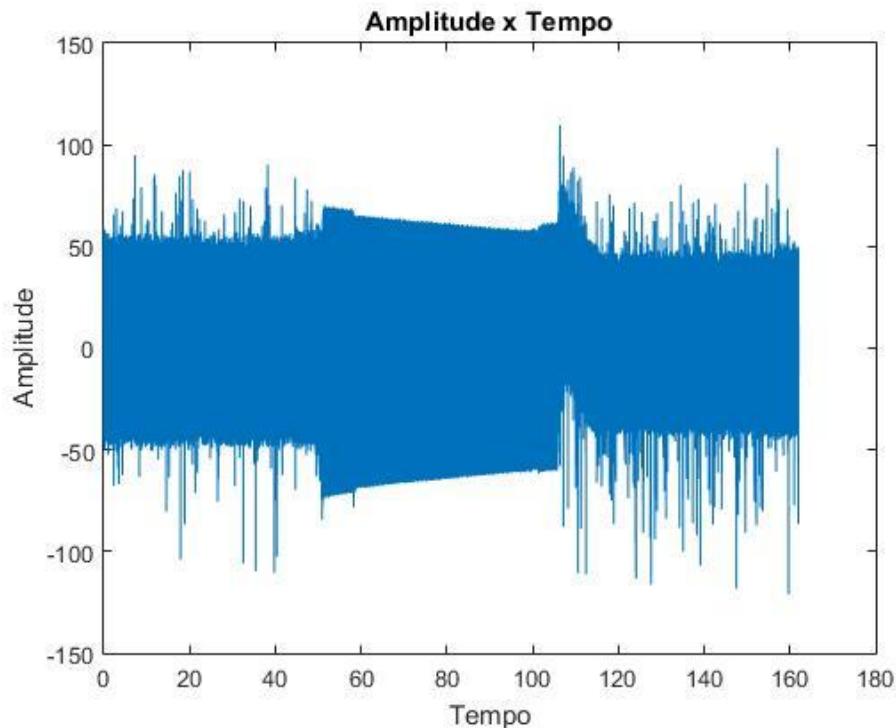
Fonte: Autor.

Na Figura 47, é verificada a mudança de rotação aos 42 segundos do ensaio, acompanhada da frequência analisada.

4.4. Rolamento oxidado

O ensaio realizado com o rolamento oxidado durou 162 segundos, no qual manteve uma rotação de 46,7 rpm do início até 49 segundos, aumentando sua rotação para 58,2 rpm até 105 segundos reduzindo novamente sua rotação para 39,4 rpm até o final do ensaio. O sinal captado teve uma taxa de amostragem de 1300 pontos por segundo e foi aplicado uma carga na haste de 5800 g. A Figura 48 apresenta a amplitude do sinal versus tempo em segundos.

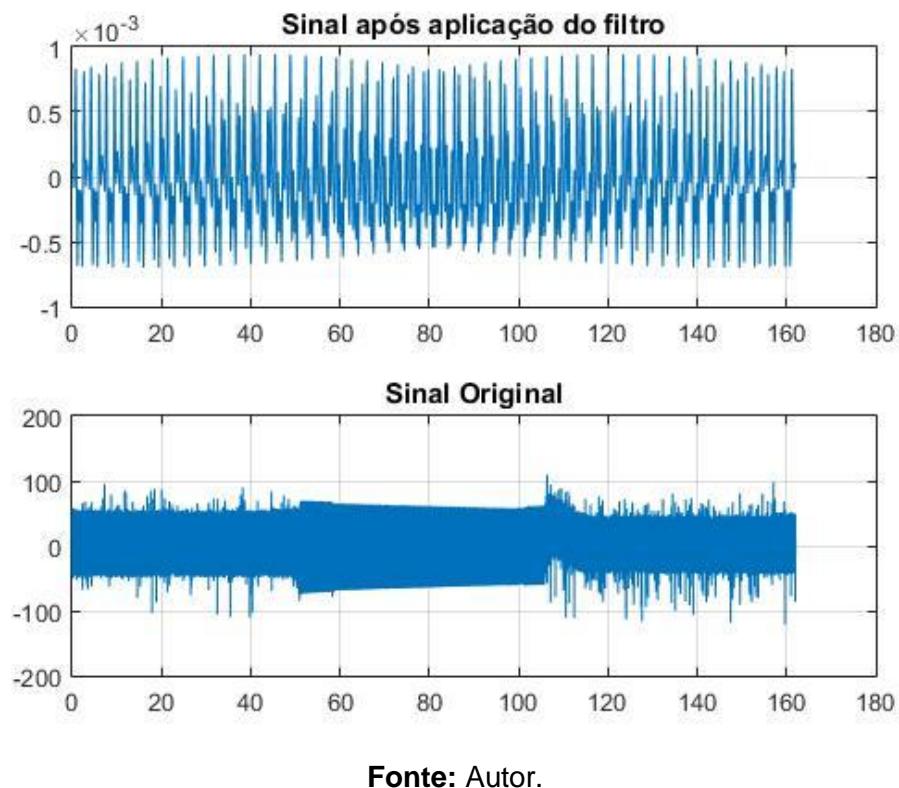
Figura 48. Sinal do rolamento oxidado amplitude x tempo



Fonte: Autor.

Com o objetivo de eliminar os ruídos é aplicado um filtro no sinal, apresentado na Figura 49.

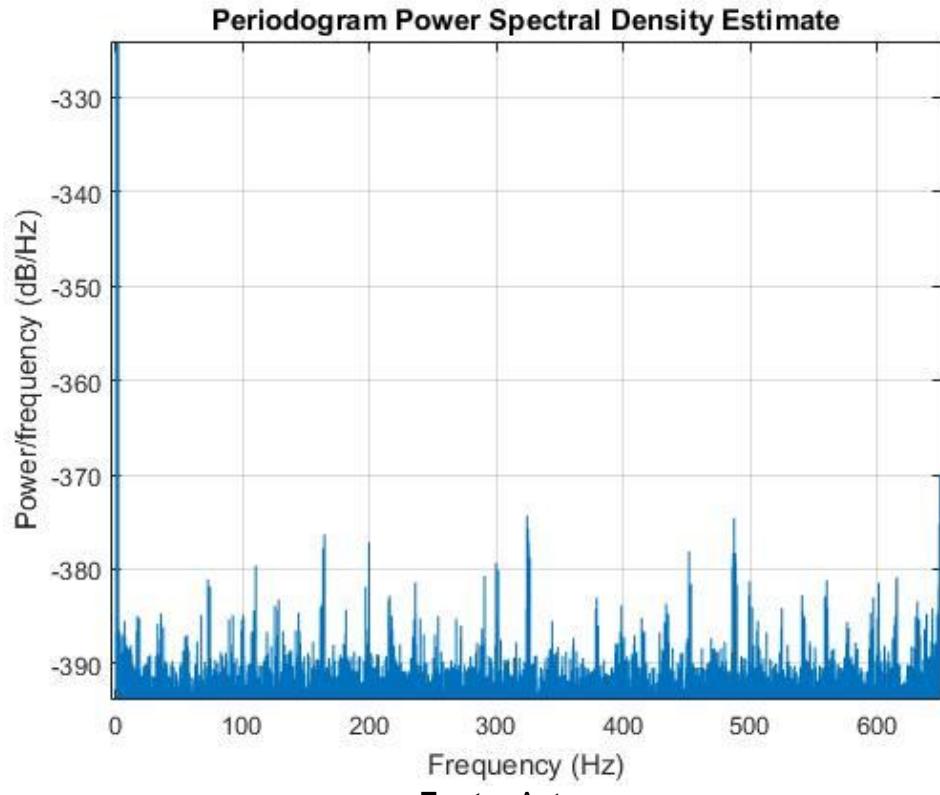
Figura 49. Sinal do rolamento oxidado com aplicação do filtro



Fonte: Autor.

Ao aplicar a PSD no sinal filtrado é obtido um gráfico frequência versus densidade espectral, sendo possível analisar as faixas de frequência do sistema na Figura 50.

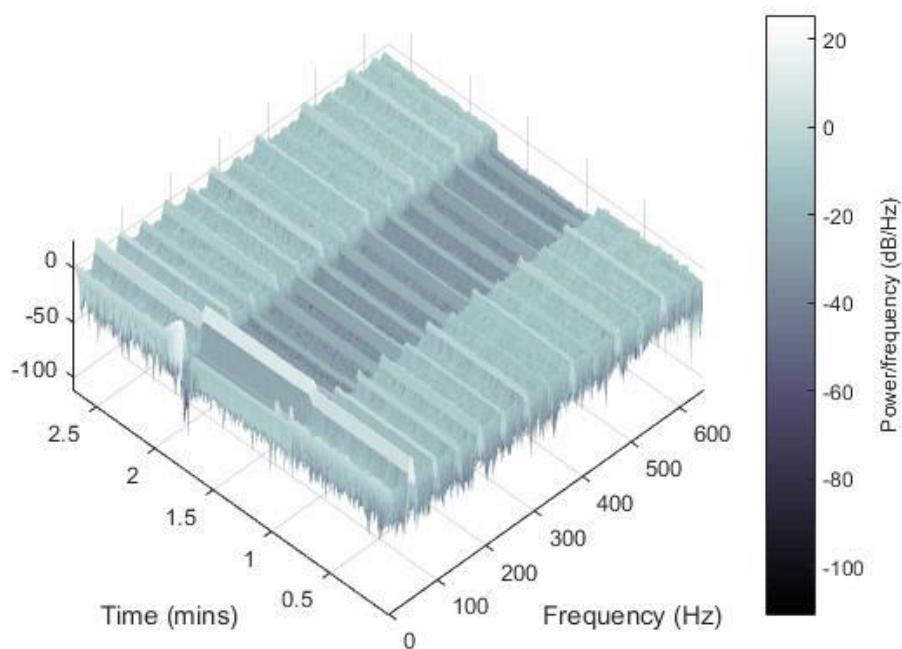
Figura 50. PSD do sinal do rolamento oxidado



Fonte: Autor.

Verificando a Figura 50, é percebido uma maior faixa de frequência próxima a 1 Hz, caracterizando a frequência fundamental do rolamento e nos seus harmônicos. Com a aplicação do filtro, foi eliminado com os ruídos a frequência de alimentação do sistema 60 Hz, porém é observado um pico de frequência irregular em 160 Hz, e em seus harmônicos em 320 Hz e 480 Hz, além de picos irregulares como em 200 Hz, 300 Hz e 440 Hz. Como a pista interna, externa, as esferas e gaiola foram oxidadas é possível ter vários picos irregulares que caracterizem o defeito devido a oxidação dos elementos do rolamento. Aplicando uma técnica de análise no domínio tempo-frequência, STFT (*Short-time Fourier Transform*) no sinal obtido no ensaio é possível demonstrar o sinal composto pelo tempo, frequência e densidade espectral, representado na Figura 51.

Figura 51. Sinal oxidado após aplicação da STFT em três dimensões



Fonte: Autor.

Na Figura 51, é verificada a mudança de rotação aos 49 segundos e 105 segundos do ensaio, acompanhada da frequência analisada.

Analizando os diferentes sinais após a aplicação do filtro no qual removeu os ruídos, é possível verificar as irregularidades nas faixas de frequência que podem caracterizar as falhas dos rolamentos, bem como a oxidação, desgaste na pista externa e introdução de areia nos rolamentos. Devido ser um sinal transiente, não é possível aplicar a Equação 2.13 para encontrar o sinal que caracteriza o defeito na pista externa, pois há uma mudança na frequência de rotação do eixo. Além disso devido à baixa rotação os picos de frequência resultam em menor amplitude dificultando a análise do sinal, necessitando de um bom filtro para remover os ruídos e possibilitar a verificação do sinal após a PSD.

A utilização da STFT após a aplicação do filtro no sinal não foi aproveitável para analisar o tempo e frequência do sinal simultaneamente, pois a mudança de rotação do eixo é verificada no sinal antes da aplicação do filtro e para a análise da frequência é necessário retirar os ruídos usando o filtro. Dessa forma seria necessário a STFT em cada um dos sinais, previamente e posteriormente a utilização do filtro.

CAPÍTULO CINCO: CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

O modelo da bancada experimental simulou satisfatoriamente um aerogerador, considerando as falhas utilizadas no sistema.

A pesquisa bibliográfica teve como intuito reunir informações sobre as características do aerogerador para utilizar em diferentes parâmetros geométricos e condições de operação, além de representar o primeiro experimento bem-sucedido, pelo menos na literatura revisada neste trabalho.

Esse estudo possibilitou o desenvolvimento de uma bancada com as características de uma turbina eólica, no qual o protótipo levou em consideração a velocidade de rotação do eixo primário, incluindo as condições climáticas como a mudança da velocidade do vento. Além disso, o material do eixo aplicado foi o mesmo do aerogerador, bem como a carga aplicada pelo rotor foi introduzida no sistema através da haste localizada na extremidade do eixo. Dessa forma foram constatadas as seguintes conclusões:

- Com a introdução dos defeitos nos rolamentos, foi possível diagnosticar a falha do sistema que foram estudadas, como a inserção de grãos de areia no rolamento, o desgaste de pista externa do rolamento e oxidação do rolamento;
- Através do experimento foi possível captar os sinais a baixa rotação utilizando um acelerômetro conectado a um módulo condicionador de sinais, posteriormente foi analisado com auxílio do software *Matlab* resultando em gráficos com sinais satisfatórios;
- Os sinais forneceram informações para construção dos gráficos que após a análise de cada rolamento verificou-se diferentes falhas constatadas no sistema, capacitando a identificação do problema através da vibração apresentada;
- Aplicando a metodologia utilizada nesta pesquisa, é possível realizar a manutenção preditiva em turbinas eólicas através do sinal apresentado pelo rolamento do sistema, comparando os gráficos dos sinais dos rolamentos com determinado defeito e o rolamento sem defeito;

- A disposição dos gráficos dos sinais nos resultados da pesquisa auxilia na verificação de falha dos rolamentos, cooperando como um mapeamento dos defeitos através de diferentes picos nas faixas de frequência;
- O modelo da pesquisa é apropriado para aplicação em aerogeradores que não possuem um monitoramento de suas falhas, cooperando para sua manutenção preditiva sem grandes custos.

A partir dessas conclusões, é sugerido os seguintes temas para trabalhos futuros:

- É de extrema relevância propor o acréscimo de novos tipos de falhas, como a descarga elétrica em rolamentos para a padronização do sinal, ampliando o mapeamento das falhas;
- Um progresso significativo para o trabalho é a utilização de outros métodos de domínio tempo-frequência para analisar o sinal, aperfeiçoando o método demonstrado nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVES, Jose Jakson Amancio. **Estimativa da Potência, Perspectiva e Sustentabilidade da Energia Eólica no Estado do Ceará.** 2006. 163 f. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Pós-Graduação em Recursos Naturais. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), 2006.

ALVES, Jose Jakson Amancio. "Análise regional da energia eólica no Brasil." Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional 6.1, 2010.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>> Acessado em 09 de julho de 2015.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. Disponível em http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/energia_eolica/images/fig6_2.jpg Acessado em 11 de julho de 2015.

ARAUJO, G. J. M. D. (2012). Sistema de aquisição de dados para estudos de transiente de pressão e detecção de vazamentos em oleodutos.

Aula Verde. Disponível em: <<http://aulaverde.masverdedigital.com/?p=3301>> Acesso em 9 de julho de 2015.

BEZERRA, R. A.; PEDERIVA, R. Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração. Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2004.

BOLDUAN, P. (2000, Old windmill Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Old_Windmill.jpg).2000.

CASTILHO, R. J. B. Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope. Diss. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

CATÁLOGO DE PRODUTOS FRM. 2010. <http://www.santarol.com.br/catalogo/FRM%20%20Mancais%20e%20Rolamentos.pdf>, acesso em 2 de março de 2015.

Da Penha, Rosani Maria Libardi. ANÁLISE DE SINAIS EM REGIME TRANSIENTE APLICANDO A TÉCNICA DE WAVELET. Diss. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1999.

DANTAS, Guilherme de A.; LEITE, André Luis da Silva. "**Os custos da energia eólica**

brasileira." 2009.

FERREIRA, Abel António de Azevedo. **Sistema de produção de energia eólica.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade do Porto. 2011.

FUNDO, R. C. F. **PROJETO DE UM AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL.** 2014. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D., Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento. **Edusp**, Sao Paulo, 2^a. ed. 2003.

HEIER, S. Grid integration of wind energy conversion systems: Wiley, 2006.

<https://wiki.duke.edu/download/attachments/13374187/darrieus.jpg>, acesso em 9 de julho de 2015.

<http://www.deutsches-museum.de/>, acesso em 9 de julho de 2015.

<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT102-Aula02.pdf>, acesso em 11 de setembro de 2015.

MAIA, Daniel Sérgio Névoa et al. Ruído de parques eólicos: análise e caracterização. 2012.

MCFADDEN, P. D. and SMITH, J. D., Model for The Vibration Produced By Single Point Defect in a Rolling Element Bearing, **Journal of Sound and Vibration** , Vol. 96(1), p. 69-81, 1984.

MCFADDEN, P. D. and Smith, J. D., Vibration Monitoring of Rolling Element Bearings by High Frequency Resonance Technique a Review, **Tribology International** , Vol. 17(1), pp. 3-10, 1984.

MCFADDEN, P. D. and Smith, J. D., The Vibration Produced By Multiple Point Defect in a Rolling Element Bearing, **Journal of Sound and Vibration** , Vol. 98(2), pp. 263-273, 1985.

OLIVEIRA, H. M. **Análise de Sinais para Engenheiros:** Uma abordagem via wavelets. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

PONCI, L. P.; CUNHA, P. M. R. **Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope.** 2005.

RANDALL, R.B.; ANTONI, J. , 2011. "Rolling element bearing diagnostic – A tutorial". Mechanical Systems and Sinal Processing, Volume 25, Pages 485-520.

REIS, R. A., LACERDA A. L. M., LAMIM F, P. C. M., Brito, J. N., 2010, "Estudo da decomposição de sinal por Wavelet para diagnosticar defeitos em rolamentos", 9º SIMMEC, Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, MG, Brasil.

REUK. Disponível em: <<http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm>> Acesso em 10 de julho de 2015.

TANDON, N.; CHOUDHURY, A. , 1999. "A Review of Vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings". Tribol Int. Volume 32, Pages 469-480.

YAGI, S. AND NINOYU, N. Technical Trends in Wind Turbine Bearings. 2008.

Apêndice I – Programas para análise dos sinais do rolamento

Programa para plotar gráfico Amplitude x Tempo (s)

```
y = [-1.514385E-1  
-4.978278E-2  
2.241729E-2  
...  
...  
...  
...]  
  
pontos = length(y);  
Fs = 1300; %Pontos por segundo, sampling frequency or sampling rate  
  
t = (0:pontos-1)/Fs;  
  
plot (t,y)  
  
title ('Espectro x Tempo')  
xlabel ('Tempo')  
ylabel ('Amplitude')
```

Programa para realizar FFT e plotar gráfico Amplitude x frequênciа (Hz)

```
y = [-1.514385E-1  
-4.978278E-2  
2.241729E-2  
...  
...  
...  
...]  
  
n = length(y);  
Fs = 1300; %Pontos por segundo  
  
NFFT = 2^nextpow2(n); % Next power of 2 from length of y NFFT  
Y = fft(y,NFFT)/Fs;  
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);  
  
% Plot single-sided amplitude spectrum.  
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))  
title('Lado Único de Espectro y(t)')  
xlabel('Frequencia (Hz)')  
ylabel('|Y(f)|')
```

Programa para realizar STFT e plotar gráfico Tempo x frequência (kHz) x densidade espectral

```
y = [-1.514385E-1  
-4.978278E-2  
2.241729E-2  
...  
...  
...]  
  
n = length(y);  
  
Fs = 1300; %Pontos por segundo
```

```
%Spectrogram STFT  
  
spectrogram (y,256,250,256,Fs)
```

Programa para o filtro digital dos sinais

```

t = (0:n-1)/Fs;

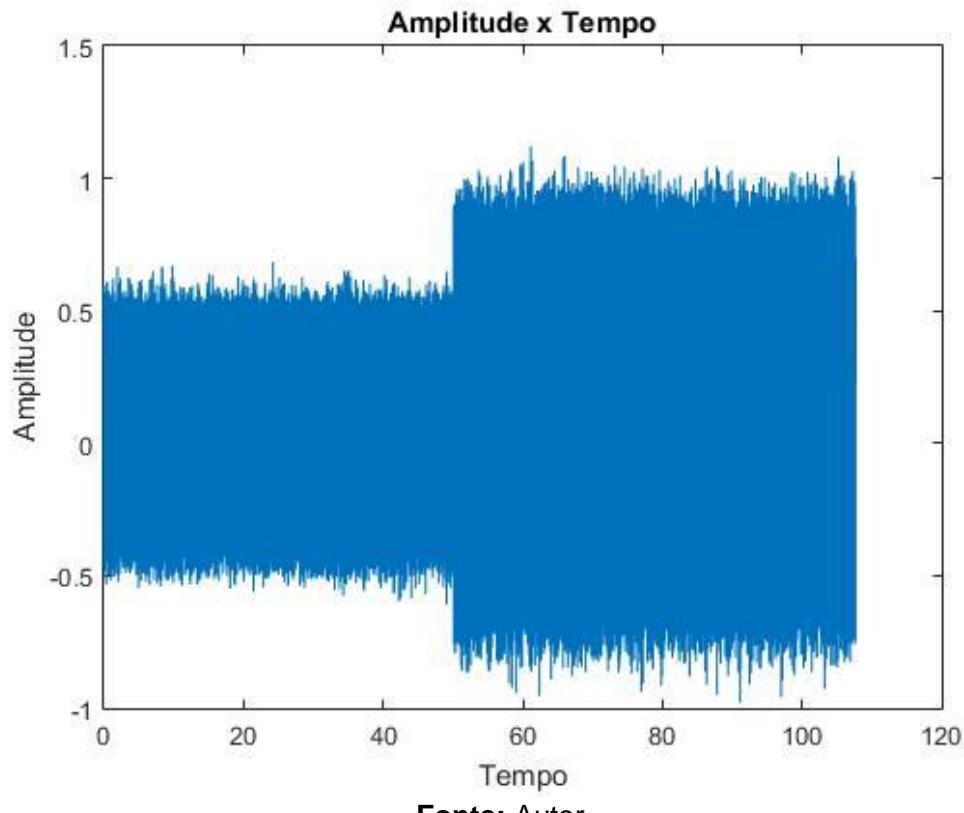
fil1 = [zeros(1,n/2-f1),ones(1,1),zeros(1,n/2-1+f1)];
fil2 = [zeros(1,n/2+f1),ones(1,1),zeros(1,n/2-1-f1)];
fil3 = [zeros(1,n/2-f2),ones(1,1),zeros(1,n/2-1+f2)];
fil4 = [zeros(1,n/2+f2),ones(1,1),zeros(1,n/2-1-f2)];
fil5 = [zeros(1,n/2-f3),ones(1,1),zeros(1,n/2-1+f3)];
fil6 = [zeros(1,n/2+f3),ones(1,1),zeros(1,n/2-1-f3)];
fil7 = [zeros(1,n/2-f4),ones(1,1),zeros(1,n/2-1+f4)];
fil8 = [zeros(1,n/2+f4),ones(1,1),zeros(1,n/2-1-f4)];
fil9 = [zeros(1,n/2-f5),ones(1,1),zeros(1,n/2-1+f5)];
fil10 = [zeros(1,n/2+f5),ones(1,1),zeros(1,n/2-1-f5)];
fil11 = [zeros(1,n/2-f6),ones(1,1),zeros(1,n/2-1+f6)];
fil12 = [zeros(1,n/2+f6),ones(1,1),zeros(1,n/2-1-f6)];
fil = fil1+fil2+fil3+fil4+fil5+fil6+fil7+fil8+fil9+fil10+fil11+fil12;

Yshift = fftshift(y);
Yf = fil.*Yshift';
yf = ifft(fftshift(Yf));
figure(5)
subplot(2,1,1)
plot(t,real(yf)),title('Sinal após aplicação do filtro'),grid

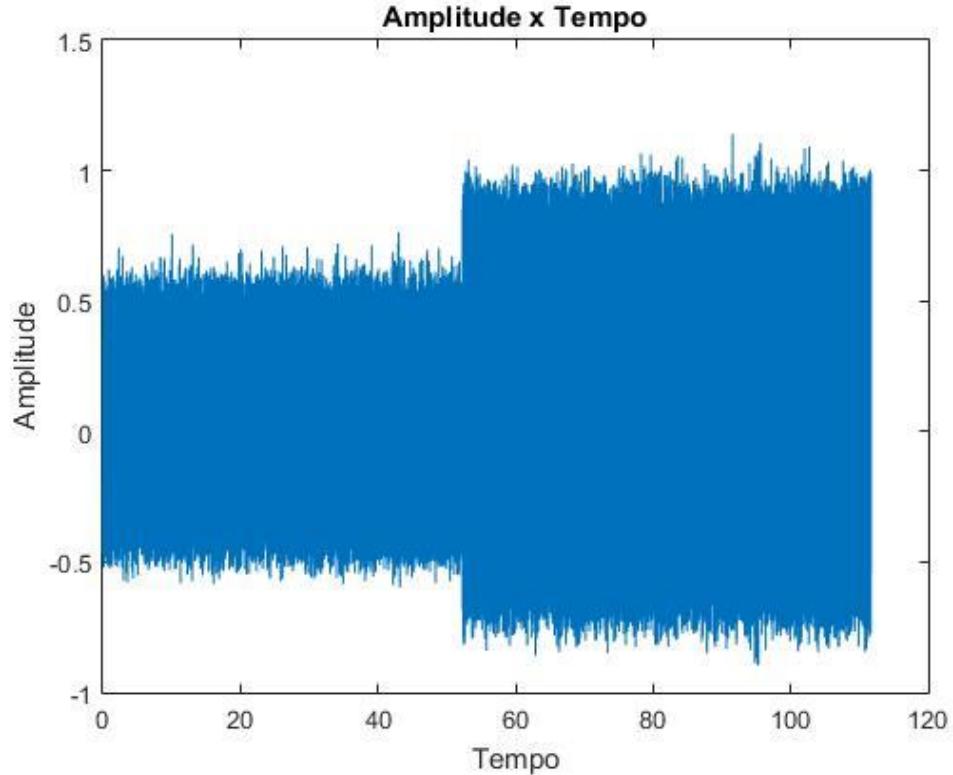
```

```
subplot(2,1,2)  
plot(t,y),title('Sinal Original'),grid
```

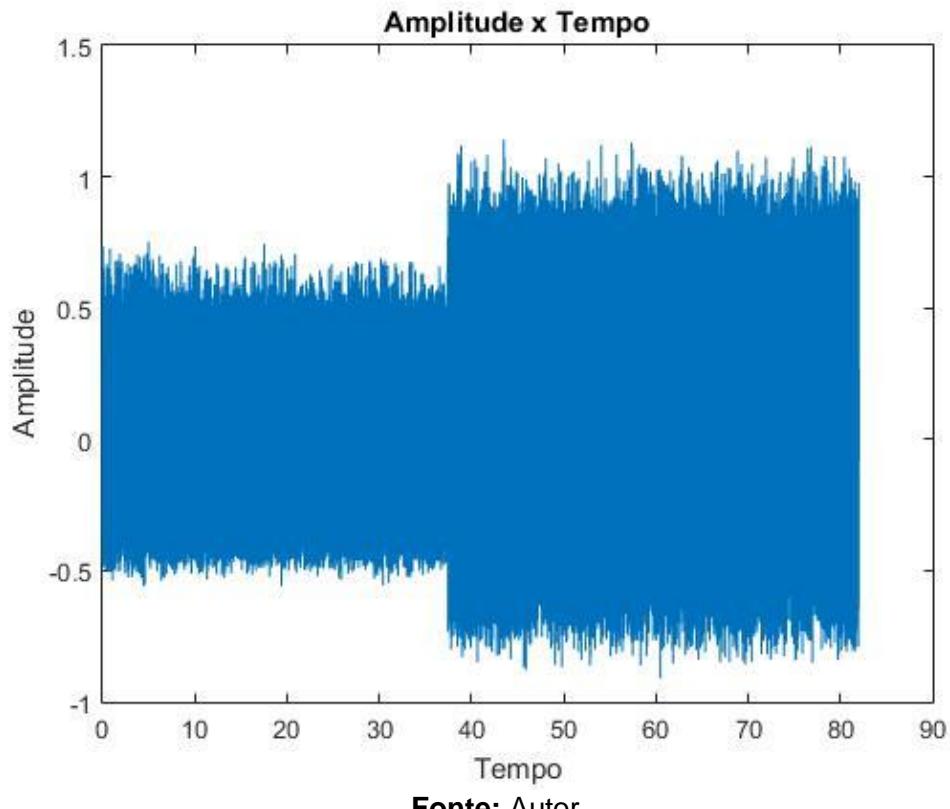
Apêndice II – Ensaios de repetições

Ensaios com o rolamento sem defeito**Figura 52.** Ensaio 1 - Sinal do rolamento sem defeito amplitude x tempo (s)

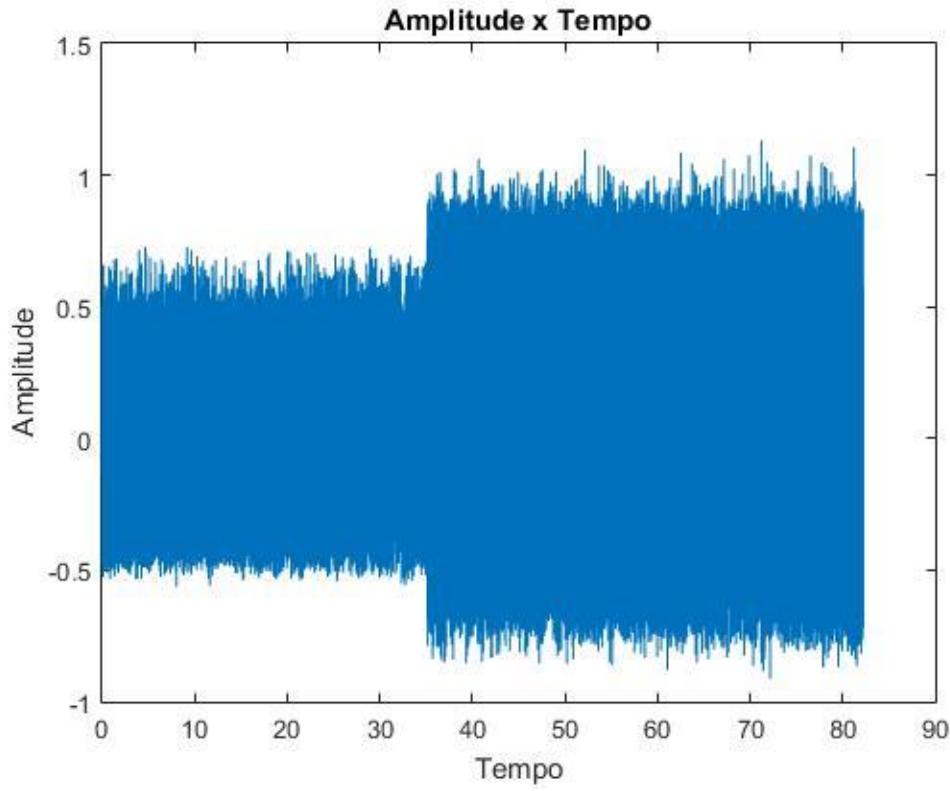
Fonte: Autor.

Figura 53. Ensaio 2 - Sinal do rolamento sem defeito amplitude x tempo (s)

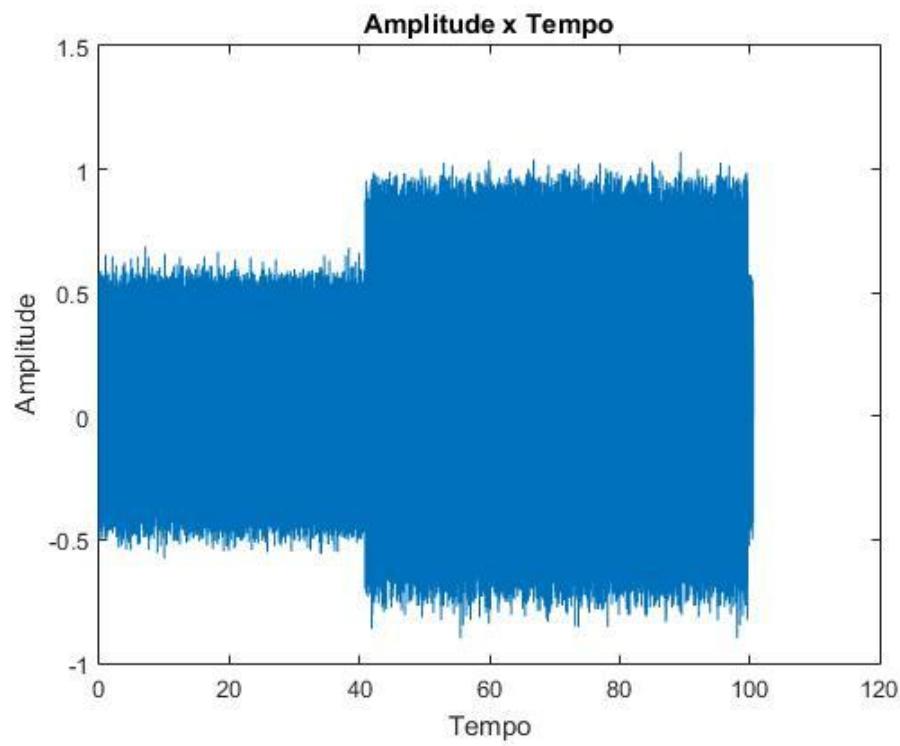
Fonte: Autor.

Ensaios com o rolamento com grãos de areia**Figura 54.** Ensaio 3 - Sinal do rolamento com grãos de areia amplitude x tempo (s)

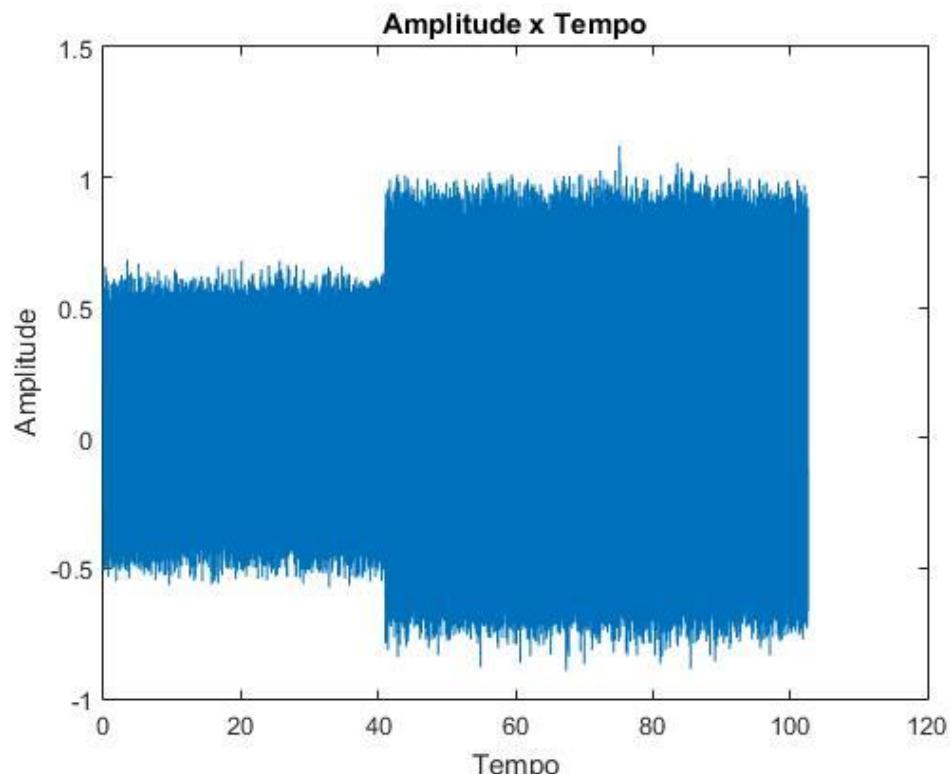
Fonte: Autor.

Figura 55. Ensaio 4 - Sinal do rolamento com grãos de areia amplitude x tempo (s)

Fonte: Autor.

Ensaios com o rolamento com desgaste na pista externa**Figura 56.** Ensaio 5 - Sinal do rolamento com desgaste na pista externa amplitude x tempo (s)

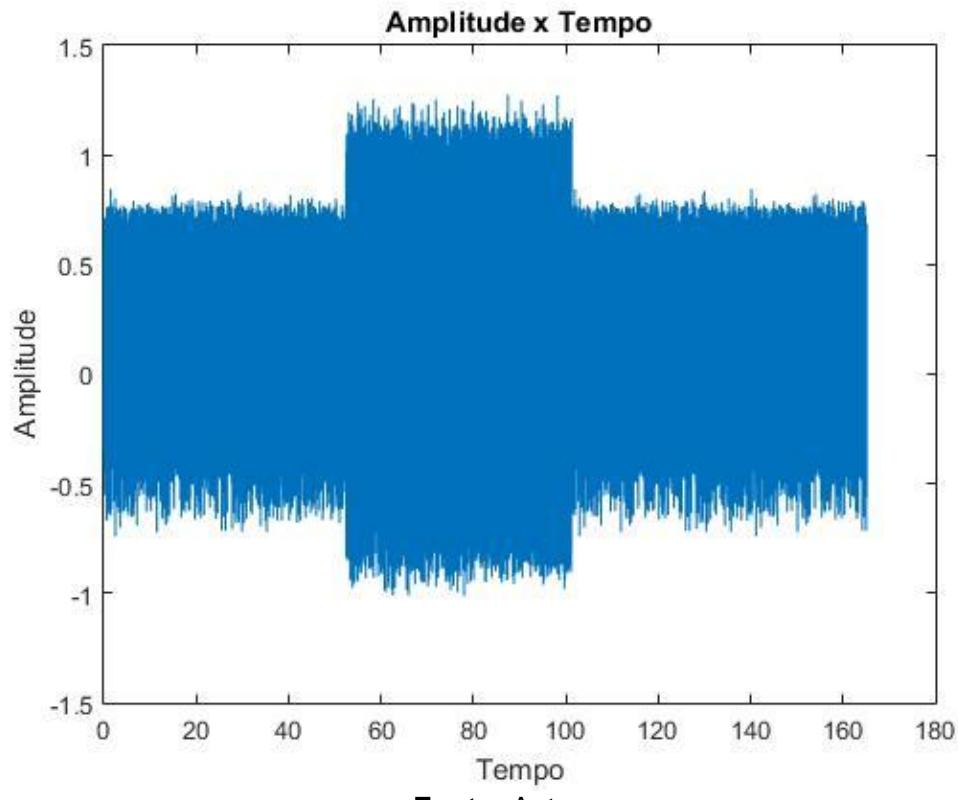
Fonte: Autor.

Figura 57. Ensaio 6 - Sinal do rolamento com desgaste na pista externa amplitude x tempo (s)

Fonte: Autor.

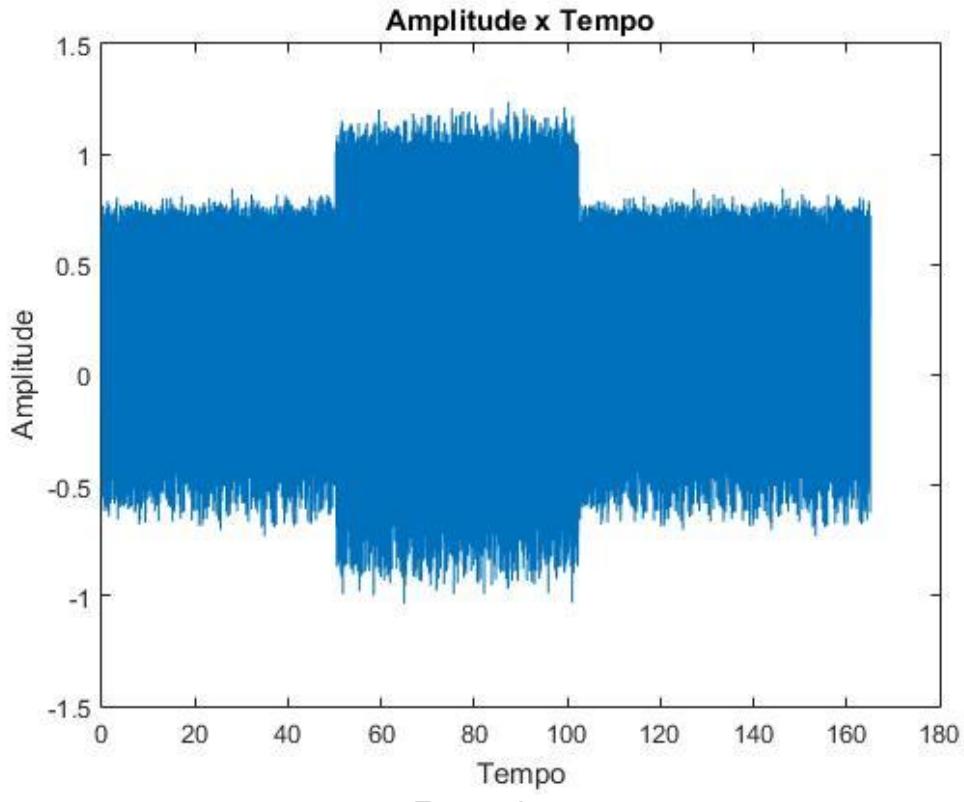
Ensaios com o rolamento oxidado

Figura 58. Ensaio 7 - Sinal do rolamento oxidado amplitude x tempo (s)



Fonte: Autor.

Figura 59. Ensaio 8 - Sinal do rolamento oxidado amplitude x tempo (s)



Fonte: Autor.