

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Luciano de Souza Oliveira

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MOTOREDUTORES DE ENGENHO DE
ARROZ UTILIZANDO ARDUINO E SMARTPHONE PARA AQUISIÇÃO
DE DADOS**

Santa Maria, RS
2023

Luciano de Souza Oliveira

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MOTOREDUTORES DE ENGENHO DE ARROZ
UTILIZANDO ARDUINO E SMARTPHONE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo de Souza

Santa Maria, RS
2023

Luciano de Souza Oliveira

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MOTOREDUTORES DE ENGENHO DE ARROZ
UTILIZANDO ARDUINO E SMARTPHONE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Engenheiro Mecânico.**

Aprovado em 10 de fevereiro de 2023:

**Carlos Eduardo de Souza, Doutor (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

Cesar Gabriel dos Santos, Doutor (UFSM)

Marcos Daniel de Freitas Awruch, Doutor (UFSM)

Santa Maria/ RS

2023

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores quantitativos globais.....	28
Quadro 2 - Tipos de frequência, suas causas e sua identificação	39
Quadro 3 - Orçamento dos equipamentos adquiridos.....	51
Quadro 4 - Especificações do motor R67.....	56
Quadro 5 - Especificações do redutor R67	57
Quadro 6 - Dados das engrenagens do redutor R67	57
Quadro 7 - Especificações do motor R77.....	57
Quadro 8 - Especificações do redutor R77	58
Quadro 9 - Dados das engrenagens do redutor R77	58
Quadro 10 - Frequências esperadas nos motoredutores R67 e R77	59
Quadro 11 – Frequências esperadas que foram encontradas	66
Quadro 12 - Valores do RMS de acordo com o eixo	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planta do engenho de arroz, localizado em Agudo, RS.....	15
Figura 2 – Fluxograma simplificado do beneficiamento de arroz	15
Figura 3 - Sistema Massa-Mola.....	24
Figura 4 - Gráfico do movimento do sistema Massa-Mola	25
Figura 5 - Curvas da aceleração velocidade e deslocamento.....	26
Figura 6 - Sinal Vibratório no domínio do Tempo	27
Figura 7 – Valores globais de medida de vibração.....	28
Figura 8 - Diferença entre gráfico domínio do tempo e domínio da frequência	30
Figura 9 - Sinal vibratório no domínio da frequência	30
Figura 10 - Exemplo de nomograma	32
Figura 11 - Engrenagens Cilíndricas	34
Figura 12 - Engrenagens Cônicas.....	34
Figura 13 - Engrenagem Coroa Sem Fim	35
Figura 14 - Comparação entre espectros de frequência	37
Figura 15 - Posicionamento dos Acelerômetros para Adquirir Sinais de Vibração....	41
Figura 16 - Exemplo do Posicionamento dos Acelerômetros	42
Figura 17 – Acoplamento do <i>smartphone</i> em Redutor.....	42
Figura 18 – Planta da área de secagem do engenho, com identificação dos tipos de máquinas.....	45
Figura 19 - Motoredutor SEW.....	46
Figura 20 - Esquema do Conjunto motoredutor	47
Figura 21 – <i>Smartphone Galaxy A8 (2018)</i>	49
Figura 22 - Placa Uno SMD R3 Atmega328.....	49
Figura 23- Placa GY521	50
Figura 24 - Circuito de ligação Arduino e shield micro SD	52
Figura 25 - Circuito de ligação Arduino e MPU 6050	52
Figura 26 - Componentes do Arduino montado.....	52
Figura 27 – Fluxograma do procedimento.....	53
Figura 28 - Posicionamento do Arduino e do <i>smartphone</i> no redutor R77.....	54
Figura 29 - Posicionamento do Arduino e do <i>smartphone</i> no redutor R67.....	54
Figura 30 - Redutor R77 acoplado a saída do secador de arroz.....	58
Figura 31 - R67 acoplado a rosca de saída do silo de arroz seco.....	59

Figura 32 – Sinal no tempo do motoredutor R67 (a) Arduino (b) <i>Smartphone</i>	61
Figura 33 - FFT dos dados obtidos do motoredutor R67	62
Figura 34 – Filtro PSD aplicado nos dados obtidos do motoredutor R67	62
Figura 35 - Sinal no tempo dos Redutores utilizando Arduino (a) R67 e (b) R77	64
Figura 36 - Espectros de Frequência R67 e R77 (Arduino)	65
Figura 37 - Espectros de Frequência com filtro PSD: (a) R67 e (b) R77 (Arduino) ...	65
Figura 38 - FFT dos eixos separadas.....	67
Figura 39 - Nomograma dos valores observados no eixo Y	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	COTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	13
1.2	OBJETIVOS	16
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	17
2.1	ENGENHO DE ARROZ.....	17
2.2	MANUTENÇÃO.....	18
2.2.1	Manutenção corretiva.....	19
2.2.2	Manutenção preventiva.....	19
2.2.3	Manutenção preditiva.....	20
2.3	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	21
2.4	CLASSIFICAÇÃO DE MÁQUINAS NA PLANTA.....	22
2.4.1	Críticos	22
2.4.2	Essenciais	23
2.4.3	Propósito Geral.....	23
2.5	VIBRAÇÃO.....	23
2.5.1	Conceito	24
2.5.2	Sistema massa-mola	24
2.5.3	Perfis de vibração.....	27
2.5.4	Transformada de Fourier e obtenção do espectro	30
2.5.5	Densidade Espectral de Potência (PSD).....	31
2.6	FAIXAS DE TOLERÂNCIA DE VIBRAÇÕES.....	32
3	MOTOREDUTOR	33
3.1	TIPOS DE ENGRENAGENS.....	33
3.2	FALHAS EM ENGRENAGENS	35
3.3	ESPECTROS DE VIBRAÇÃO.....	36
3.4	FONTES DE VIBRAÇÃO	38

3.4.1	Desbalanceamento	39
3.4.2	Desalinhamento	40
3.4.3	Eixo Torto e Rolamentos Inadequados	40
3.5	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO SINAL NO MOTOREDUTOR.....	40
3.5.1	Medição de Vibração	40
3.5.2	Transdutor.....	43
3.5.3	Sistema de Conversão Analógico/Digital e Software de Aquisição.....	43
4	METODOLOGIA.....	44
4.1	ESTUDO DA PLANTA	44
4.2	CADASTRO DE EQUIPAMENTOS.....	46
4.3	ESTUDO PRELIMINAR DE VIBRAÇÕES.....	47
4.4	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	48
4.4.1	Dispositivos para aquisição dos dados	48
4.4.2	Aquisição dos dados.....	53
4.4.3	Montagem para aquisição dos sinais	53
4.4.4	Processamento do sinal	54
5	RESULTADOS	56
5.1	FAIXAS DE FREQUÊNCIA PRELIMINARES	56
5.2	ESPECTROS DE VIBRAÇÃO.....	60
5.2.1	Comparação dados do Arduino com o <i>smartphone</i>	60
5.2.2	Comparação R67 e R77	63
6	CONCLUSÃO.....	69
6.1	TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXO A – CÓDIGO PRINCIPAL DO OCTAVE	73
	ANEXO B – CÓDIGO COMP_FFT_COMPLEX_CO.....	77
	ANEXO C – CÓDIGO COMP_PSD.....	78

RESUMO

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MOTOREDUTORES DE ENGENHO DE ARROZ UTILIZANDO ARDUINO E SMARTPHONE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

AUTOR: Luciano de Souza Oliveira

ORIENTADOR: Carlos Eduardo de Souza

O objetivo deste trabalho é avaliar motorreductores em um engenho de arroz através da análise de vibração, utilizando Arduino e *smartphone* para aquisição de dados. Foi feito um levantamento dos principais equipamentos da empresa, sob o ponto de vista de vibrações mecânicas. Estes equipamentos foram dispostos na planta base e em seguida foram utilizados princípios da manutenção para realizar a análise de criticidade, bem como a experiência dos funcionários. Buscou-se identificar a máquina mais crítica, a partir do histórico e vivência dos funcionários da empresa, para permitir o planejamento de um monitoramento contínuo específico. Com isso, foi determinado o Motoredutor SEW como o mecanismo mais crítico para a produção. Foram utilizadas técnicas de análise de vibração aos dados de aceleração obtidos através de um celular e um Arduino. Posteriormente, foi aplicado a transformada de Fourier, possibilitando-se trabalhar no domínio da frequência, o que resultou numa melhor execução do monitoramento do equipamento. Após o processamento do sinal, utilizando o *Octave*, foi possível identificar as suas principais frequências de operação. Dessa forma, realizou-se duas comparações, a primeira entre o sinal obtido pelo celular e o Arduino e a segunda entre um motoredutor com funcionamento normal e um motoredutor que apresentava um ruído em operação. O monitoramento permitirá a realização de manutenção preditiva, o que ajuda a diminuir custos e evitar falhas catastróficas. Concluiu-se que a densidade do sinal com ruído é maior que a do equipamento em bom funcionamento e não foi observado grandes variações nos valores RMS. Além disso, o celular utilizado não tem grande aplicabilidade para este tipo de equipamento. Por fim, identificou-se oportunidades de pesquisas posteriores com o uso de equipamentos mais recentes.

Palavras-chave: Vibração. Manutenção. Previsão de falhas. Prevenção de falhas. Criticidade. *Smartphone*. Arduino.

ABSTRACT

VIBRATION ANALYSIS IN RICE ENGINEERING GEARED MOTORS USING ARDUINO AND SMARTPHONE FOR DATA ACQUISITION

AUTHOR: Luciano de Souza Oliveira

ADVISOR: Carlos Eduardo de Souza

The aim of this work is to evaluate geared motors in a rice mill through vibration analysis using an Arduino and a cell phone for data acquisition. A survey of the company's main equipment was carried out from the point of view of mechanical vibrations. This equipment was plotted on a base plan, and then maintenance principles were used to perform the criticality analysis, as well as the employees' experience. Based on the history and experience of the company's employees, it was aimed to identify the most critical machine to allow specific continuous monitoring planning. Therefore, the SEW Gearmotor was determined to be the most critical mechanism for production. Vibration analysis techniques were used for acceleration data that was gathered through a cell phone and an Arduino. Subsequently, the Fourier transform was applied, making it possible to work in the frequency domain, which resulted in better execution of the equipment monitoring. After processing the signal using Octave, it was possible to identify its main operating frequencies. In this way, two comparisons were made: the first was between the signal obtained by the cell phone and the Arduino, and the second was between a geared motor with normal operation and a geared motor that made noise during operation. Monitoring will allow for predictive maintenance to be carried out, which helps to reduce costs and avoid catastrophic failures. This work concluded that the density of the signal with noise is greater than that of the equipment in good working order, and no large variations were observed in the RMS values. In addition, the cell phone used does not have great applicability for this type of equipment. Finally, it identified opportunities for further research using the latest equipment.

Keywords: Vibration. Maintenance. Failure forecast. Failure prevention. Criticality. Cell phone. Arduino.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas ou equipamentos mecânicos estão sujeitos à deterioração devido ao desgaste operacional, que pode levar ou não a defeitos que afetam a qualidade ou a continuidade do processo. Uma falha de um sistema importante pode ocasionar em uma parada completa da linha de produção, gerando na maioria dos casos prejuízos enormes e também aumentar o *lead time*, ou seja, o tempo em que o sistema de produção gasta para transformar a matéria prima em produto para o consumidor (LAGO, 2007).

Diante de um grande aumento da automação das linhas de produção nas indústrias, as máquinas se tornam um dos principais recursos para a produção. Contudo, muitas vezes a gestão de manutenção preventiva ou preditiva é deixada de lado e atua, apenas, utilizando ações corretivas. Essa estratégia acaba por gerar quedas de produção, e a constante ocorrência de avarias resulta em mobilização de recursos que poderiam ser alocados para aumentar a produtividade (HERPICH e FOLGLIATTO, 2013).

A manutenção é a principal ferramenta para manter ou para readequar os equipamentos e mantê-los funcionando. Segundo a NBR 5462 a manutenção pode ser classificada como corretiva, preventiva e preditiva. A manutenção corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. A manutenção preventiva por sua vez é manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. E a manutenção preditiva permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Com isso, a não realização da manutenção preventiva pode causar paradas repentinas, a necessidade de deslocamento de capital humano e até interrupção da produção e a manutenção preditiva ajuda na identificação do problema antes de se tornarem falha, possibilitando um melhor planejamento para a execução da manutenção reduzindo assim os custos e realizando uma manutenção mais efetiva.

Uma das principais técnicas de acompanhamento do funcionamento de máquinas é a análise de vibrações, que permite, através de parâmetros pré-estabelecidos, saber se um conjunto mecânico está em bom funcionamento ou é necessário executar manutenção, por meio da comparação com padrões de sinais de operação da máquina com funcionamento normal (RAO, 1990).

A criticidade de equipamentos é uma ferramenta muito utilizada, para que as empresas possam elaborar planos de manutenção de máquinas e equipamentos. Ela tem como principal função alinhar o planejamento da manutenção de acordo com a criticidade e o impacto de cada equipamento ao negócio (PIRES, 2018). Desse modo, sabendo a criticidade de cada equipamento, é possível identificar o tipo de manutenção e o modo mais eficiente de abordagem de acordo com a importância da máquina, assim, tendo um plano de manutenção mais eficiente e alinhado com os objetivos da empresa. Neste sentido, no trabalho é apresentado um estudo, onde primeiro é determinado uma máquina crítica em uma planta de um engenho de arroz. E em seguida apresentado um estudo de análise de vibrações sobre o mesmo.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A cultura de arroz tem grande importância no mundo, sendo este o segundo grão mais cultivado em 2019, com uma produção de 755,5 milhões de toneladas, conforme dados da Embrapa (2019). O arroz é um alimento que é consumido principalmente por humanos e o grão que sai do campo é consumido quase que sem processo de industrialização. No Brasil em 2018, segundo a Embrapa (2019), o ano agrícola brasileiro resultou em uma colheita de 11,7 milhões de toneladas colhidas em 1,9 milhões de hectares. Este grão pode ser produzido em diversos ecossistemas, com destaque para o de várzea e de terras altas.

No Brasil a região Sul concentra cerca de 67% da área e 82% da produção nacional de arroz. A maior parte do arroz produzido no Brasil é irrigado tendo uma média de 90% do arroz produzido e apenas 10% sendo arroz sequeiro (CONAB, 2020b). Nesse cenário, as indústrias de arroz tem grande importância para o beneficiamento da produção.

Este trabalho foi realizado na Agroindústria Dickow Alimentos Ltda., localizada na cidade de Agudo, Rio Grande do Sul. Desde 1959 atua no ramo do

beneficiamento de arroz, tendo como compromisso, a qualidade a qual se inicia com a seleção rigorosa da matéria-prima, e na industrialização com equipamentos de última geração. A empresa conta com a certificação ISO 9001:2008 conquistada em 2010, estando entre as primeiras empresas do ramo a conquistar tal certificação. Em 2014 a empresa garantiu o terceiro lugar no Prêmio Qualidade RS, através do da avaliação do seu sistema de gestão (DANIELA_NEU, 2019). Sua planta é apresentada na Figura 1 e o seu processo de beneficiamento de arroz é ilustrado pelo fluxograma da Figura 2.

O insumo de sua produção é arroz em casca, majoritariamente de produção própria contudo, uma parte provem de produtores da região, que chegam através de caminhões. E então é feita a coleta através da calagem, que é a retirada de amostras de diversos pontos da carga. As amostras são postas em um balde e depois separadas em porção de 100g.

Em seguida é aferida a umidade do arroz e posto a amostra em uma unidade de beneficiamento de laboratório para medir o rendimento do arroz e assim é possível saber o percentual de grãos inteiros, quebrados e de impurezas presentes na amostra e então o arroz pode ser precificado.

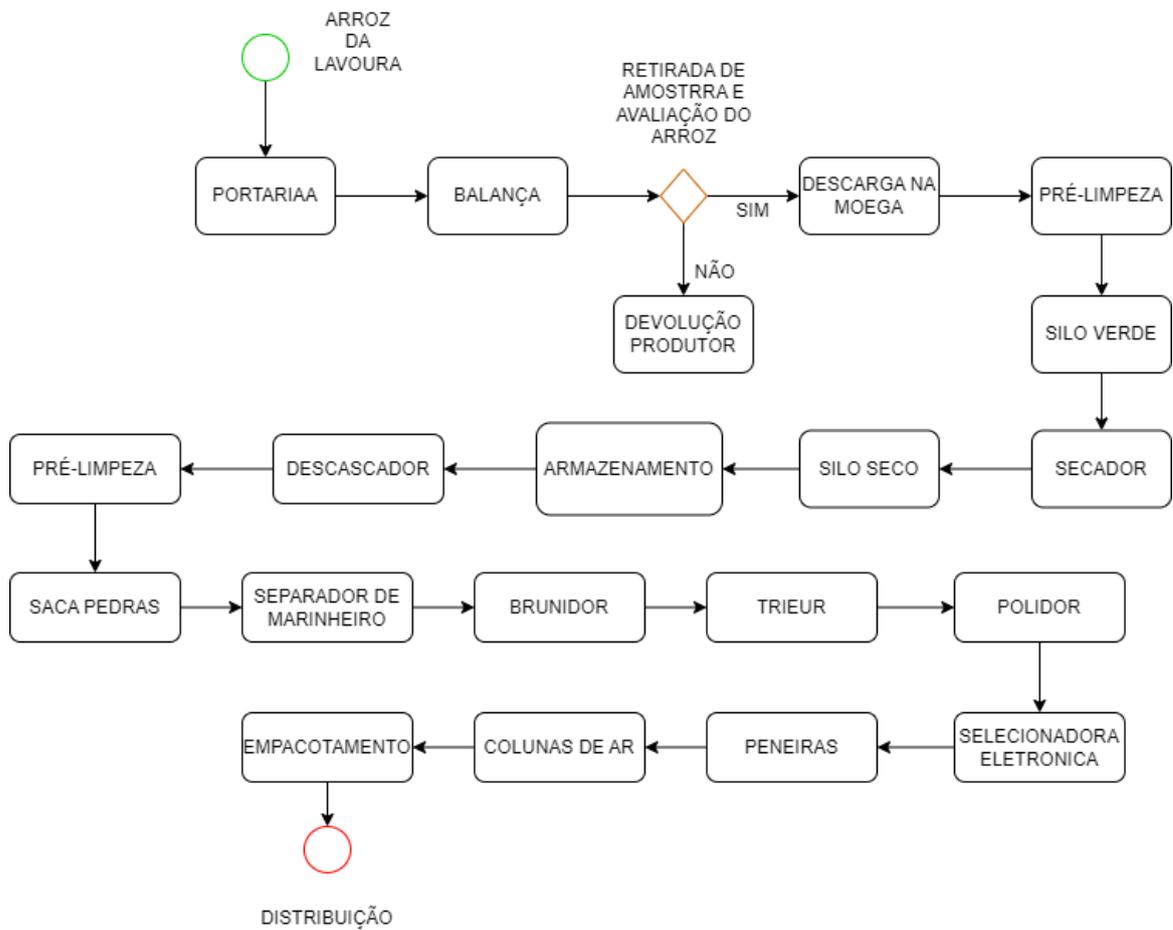
Com isso, o caminhão pode seguir para a balança para ser pesado e em seguida destinado as moegas, onde é realizada a descarga do arroz e o transporte para os secadores, através de roscas transportadoras e elevadores de canecas. Após a secagem e com sua umidade no padrão da empresa este é transportado para peneiras e posteriormente para os silos de armazenamento para ser posteriormente beneficiado.

O beneficiamento do arroz armazenado é feito primeiramente pelo descascamento e em seguida passa por diversos outros equipamentos, desde brunidores e peneiras até por fim passar por uma selecionadora eletrônica que determina o tipo de arroz, os separa e por fim passa por uma peneira e então é embalado e enviado para o consumidor.

Figura 1 - Planta do engenho de arroz, localizado em Agudo, RS



Figura 2 – Fluxograma simplificado do beneficiamento de arroz



Fonte: AUTOR, 2023

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar um estudo de vibrações em máquinas operando em um engenho de arroz.

Os objetivos específicos então podem ser definidos, começando pelo mapeamento de todos os equipamentos da área de secagem de um engenho de arroz, em seguida serão determinados os equipamentos com maior criticidade, a realização de um estudo preliminar de vibrações baseado na literatura, aquisição dos sinais, processamento dos mesmos e por fim a execução de uma análise desses sinais.

A análise de vibração dos equipamentos críticos será feita utilizando o *smartphone* e o Arduino como sistemas de aquisição dos sinais. Por fim será feita uma comparação entre os resultados dos dispositivos de aquisição.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Nesta seção são tratados os principais conceitos sobre monitoramento e manutenção de máquinas, e uma breve introdução aos conceitos de vibrações mecânicas.

2.1 ENGENHO DE ARROZ

Este trabalho foi realizado na área de secagem de um engenho de arroz, conforme observado o processo de beneficiamento de arroz no fluxograma da Figura 2, o processo de secagem inclui desde a etapa de chegada da carga nas moegas até o transporte do arroz para o engenho, que depois é então beneficiado.

Neste sentido, os equipamentos que constituem este processo podem ser divididos por armazenamento, limpeza, transporte e secagem. Os equipamentos utilizados para armazenagem são os silos, que podem ser classificados em dois tipos: silos menores, destinados à armazenagem temporária dos grãos antes e depois da secagem, e silos maiores, com capacidade de até 100.000 sacos, onde os grãos ficam armazenados até irem para o beneficiamento. Na limpeza, é utilizado apenas a peneira de pré-limpeza para limpeza dos grãos na área de secagem. Para o transporte é utilizado em sua maioria roscas transportadoras (helicoides) e elevadores de canecas, contudo, há certos transportes que são feitos por correias transportadoras (fitas de borracha). Por fim, para a secagem é utilizado somente o secador que tem como fonte de calor a queima da casca do arroz, que provem do processo de beneficiamento do grão.

Os equipamentos mais relevantes para o propósito deste trabalho estão no setor de transporte, os quais operam por meio de motores elétricos acoplados a redutores. Devido ao fato de ser uma área que opera quase 24 horas por dia durante a safra e lida com cargas pesadas, é essencial que a equipe de manutenção mantenha uma atenção constante para garantir o bom funcionamento dos equipamentos.

2.2 MANUTENÇÃO

A manutenção é a principal ferramenta para manter ou para readequar os equipamentos e mantê-los funcionando. O conceito de manutenção teve sua origem pelos militares que davam para este termo o significado de manter o efetivo e o material em nível constante de unidades de combate (MONCHY, 1989). Na indústria se introduziu esse termo em meados da década de 50, onde o utilizavam como sinônimo de conservação. Hoje é o principal objetivo das indústrias e empresas, diminuir as despesas utilizando a manutenção para garantir uma continuidade e confiabilidade produtiva das máquinas (MONCHY, 1989).

Segundo a NBR 5462, manutenção é um conjunto de ações técnicas, e administrativas que tange como um todo o ramo da área industrial. É um sistema único que destina manter ou recolocar um equipamento, instalação ou maquinário de um determinado setor. Sua principal função é manter em ordem o funcionamento dos equipamentos por meio de intervenções corretas e oportunas. Pode ser classificada como corretiva, preventiva ou preditiva.

Kardec e Nascif (2009) descrevem a manutenção a partir de três fases: a primeira, a partir da revolução industrial onde era feito uma manutenção baseada em limpeza, lubrificação e reparo após quebra, era realizada principalmente pelo operador, durou até 1940. Segunda fase está localizada no período de 1940 à 1970, surgiu durante a Segunda Guerra Mundial devido à grande necessidade de ter os equipamentos disponíveis e confiáveis, estes já eram produzidos em massa, e com a necessidade de suprir a guerra, foram necessários estudos dos componentes e assim desenvolvidos sistemas que concertassem, mas que também evitassem as quebras. Este novo tipo de manutenção é denominado Manutenção Preventiva, que segundo a NBR 5462 é manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

E então na década de 70 surge a terceira fase, onde há um aprimoramento da manutenção preditiva em consequência as novas tecnologias computacionais introduzidas na indústria, nesse momento se buscava além da disponibilidade e confiabilidade, também a redução de custos e uma maior qualidade. Este aprimoramento se deu devido a facilidade de adquirir e monitorar as máquinas por

meio de computadores assim então surge a manutenção preditiva que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (NBR 5462, 1994).

2.2.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é aquela empregada em equipamento que apresenta defeito ou funcionamento diferente ao esperado. Além disso, a manutenção corretiva pode ser utilizada como meio de corrigir uma falha que foi por exemplo, identificada a partir da análise das variáveis operacionais, ou seja, não atua exclusivamente como uma ação de emergência (KARDEC e NASSCIF, 2009).

Funciona bem se a parada dos equipamentos não afetar a produção e se o custo da mão de obra e do material não tem tanto impacto. A desvantagem é que o departamento de manutenção tem que estar em estado de alerta para possíveis falhas inesperadas. Quando ocorrer a falha e parar a produção, as atividades de manutenção vão requerer um inventário de peças grandes para que a correção aconteça imediatamente.

É o mais ineficiente modo de manter uma produção funcionando. Além de ocasionar em um *overworked*, ou seja, os funcionários chegam para trabalhar, sempre com uma lista grande de afazeres. Apesar de todos os pontos negativos há ainda diversas plantas produtivas que funcionam com esta filosofia de manutenção. (SCHEFFER e GIRDHAR, 2004).

2.2.2 Manutenção preventiva

Segundo Kardec e Nascif (2009) a manutenção preventiva, é utilizada como formas de prevenir a falha, contudo muitas vezes é necessário tirar o equipamento de funcionamento, e é comum realizar a intervenção da manutenção preventiva sem necessidade, o que pode gerar prejuízos.

Esta filosofia de manutenção segue uma lógica temporal, ou seja, baseada no tempo de uso do equipamento. Logo, é um meio que requer panejamento, baseado

principalmente nos manuais dos fabricantes e no histórico de manutenção das máquinas, sempre tentando estar alinhado com a produção da indústria.

2.2.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é executada a partir da avaliação de alteração em parâmetros operacionais, cujo acompanhamento é feito a partir de uma sistemática. Também é conhecida como manutenção baseada no estado do equipamento. Tem como objetivo tentar definir o estado futuro de um equipamento, por meio da análise de dados coletados ao longo do tempo, por instrumentos específicos (NBR 5462, 1994).

Os parâmetros de monitoramento dependem das características dos mesmos. Em redutores pode se analisar os lubrificantes, a vibração dos rolamentos e engrenagens e também por meio do aferimento da temperatura, sendo possível assim, identificar desgastes e possíveis falhas.

Uma de suas principais vantagens é que não há necessidade de um estoque grande de peças, pois como a falha é identificada antes de acontecer pelos parâmetros preestabelecidos, há tempo hábil para que a peça seja comprada para que o reparo seja feito. A manutenção passa a operar, somente quando necessário o que pode gerar um aumento produtivo e reduzir custos (SCHEFFER e GIRDHAR, 2004).

A principal desvantagem é a necessidade de compra de equipamentos de monitoramento especializados, além de treinamento para os funcionários. Uma alternativa seria terceirizar o serviço de monitoramento para uma empresa com expertise no assunto (SCHEFFER e GIRDHAR, 2004).

A evolução da indústria impacta a manutenção, proporcionando assim, uma evolução dos equipamentos e dos modos de gerenciamento dos mesmos. Na indústria 4.0 há um desenvolvimento tecnológico, que proporciona melhoras na manutenção preditiva, como a evolução na aquisição dos dados por sensores, análise e tratamento dos dados coletados, proporcionando também um monitoramento remoto dos equipamentos.

2.3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Manutenção preditiva usa diversas técnicas para avaliar o equipamento e fazer um diagnóstico, estas podem ser citadas (SCHEFFER e GIRDHAR, 2004).

- a) Análise de vibrações: esta é sem dúvida a técnica mais efetiva e mais utilizada para a detecção de defeitos mecânicos de máquinas com elementos rotativos;
- b) Emissão acústica: esta pode ser utilizada para detectar, localizar e monitorizar continuamente fendas em estruturas e tubagens (os ultrassons também podem ser incorporados nesta técnica manutenção);
- c) Tribologia: podem ser efetuadas análises ao desgaste dos rolamentos e ao óleo de lubrificação (sendo para tal necessário retirar uma amostra do equipamento que se pretende analisar. O aparecimento de determinadas partículas microscópicas pode estar na origem de desgastes elevados nos rolamentos e nas rodas dentadas. Exemplos de análises que se podem fazer ao óleo citam-se as seguintes: análise espectrográfica (análise química), ferrografia (separação de partículas ferromagnéticas) e análise de detritos;
- d) Monitorização de corrosão: podem ser realizadas medições ultrassônicas em tubagens e outros tipos de equipamentos do processo para acompanhar a ocorrência de desgaste corrosivo;
- e) Termografia: pode ser utilizada para analisar equipamentos elétricos e mecânicos ativos. Este método pode detectar defeitos térmicos ou mecânicos em geradores, caldeiras, acoplamentos desalinhados, sobreaquecimento de motores elétricos, entre outros;
- f) Monitorização de performance: esta é uma técnica muito eficiente na determinação de problemas operacionais no equipamento. A eficiência das máquinas proporciona uma boa visão sobre o seu estado interno de funcionamento.

Para o tipo de análise que será utilizada na máquina crítica da planta de estudo, o método de análise de vibração foi determinado por ter um método de

aquisição acessível através de acelerômetros. Pormenores da metodologia estarão descritas nos capítulos subsequentes.

Perfis de vibração podem ser obtidos para máquinas que tem sistemas rotativos ou elementos de movimento podem ter como principal forma de análise a técnica de vibração, para manutenção preditiva. Programas de manutenção usam comumente em máquina rotativas a análise de vibração para o monitoramento pra detectar problemas e prever falhas (MOBLEY, 1999).

2.4 CLASSIFICAÇÃO DE MÁQUINAS NA PLANTA

Os processos produtivos de uma empresa são compostos por instalações e equipamentos, que são expostos a condições que vêm ou não a influenciar seu desempenho. A falhas no equipamento que diz respeito a manutenção como, qualidade do planejamento e execução, comprometimento e qualidade dos fornecedores, podem refletir diretamente na confiabilidade e disponibilidade do processo produtivo. Assim, quanto maior a influência da falha de uma máquina no processo maior é sua criticidade (MACEDO, 2011).

Os diferentes tipos de manutenção mencionados, tem suas próprias características e são implementadas após uma análise de criticidade na planta de equipamentos. Segundo Scheffer e Girdhar (2004) geralmente os equipamentos são classificados como críticos, essenciais e de propósito geral, estes são detalhados a seguir.

2.4.1 Críticos

Os equipamentos críticos são aqueles que possuem alta importância na planta, onde sua falha pode afetar a segurança da indústria, máquinas que ao pararem geram uma interrupção no processo produtivo, também máquinas que tenham um alto custo ou que demandem muito tempo para executar um reparo e por fim as máquinas onde um bom funcionamento é sinônimo de economia de energia.

São os equipamentos mais importantes da planta e que sua falha pode custar muito para a planta, então é nesse tipo de equipamento que se aplica na maioria dos casos a manutenção preditiva. Instrumentos de monitoramento de vibrações são providos com capacidade de monitoramento contínuo.

2.4.2 Essenciais

Equipamentos essenciais são aqueles que sua falha pode comprometer a segurança da planta, onde a sua parada compromete apenas parte do processo ou uma unidade operacional. Podem ter ou não um sobressaliente instalado, sua inicialização é possível, mas pode afetar o processo, equipamentos que tem despesa moderada, expertise e tempo para reparar e algumas máquinas que demandam manutenção baseada em tempo de demanda, como compressores de reprodução.

Para este tipo de equipamentos é empregada a manutenção preventiva na maioria dos casos ou em tempos em tempos uma aferição por preditiva menos sofisticada. Sensores de vibração por exemplo, podem ser do tipo scanner.

2.4.3 Propósito Geral

Por fim, os equipamentos de propósito geral são aqueles em que a falha não afeta a segurança e nem a produtividade da planta, que podem operar sob demanda ou possuem um sobressaliente, não demandam muito conhecimento para reparar e tem custos baixos ou moderados e também não causam um dano secundário ou este é mínimo.

Normalmente é utilizado a manutenção corretiva na maioria dos equipamentos de propósito geral, contudo em plantas atuais até esses equipamentos não são deixados de lado e estão sendo monitorados com o uso de instrumentos portáteis.

2.5 VIBRAÇÃO

Nesta seção são apresentados os conceitos iniciais de vibrações, bem como uma apresentação da análise de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência. Apresentação da Transformada Rápida de Fourier e por fim a aplicação da análise de vibração na manutenção.

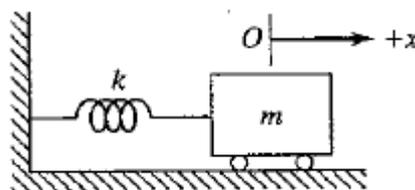
2.5.1 Conceito

O estudo de movimentos repetidos de corpos em relação a um sistema de referência estacionário é denominado vibração. Vibrações podem ser observadas no nosso cotidiano, os exemplos mais conhecidos são, as cordas de uma guitarra, o movimento vertical de um automóvel e também o balançar de um edifício devido ao vento. A explicação física dos fenômenos de vibração envolve a interação entre a energia potencial e cinética. Assim, um sistema vibratório deve ter um componente que armazena energia potencial e a libera na forma de energia cinética (movimento) de uma massa, e então o movimento da massa transfere de volta sua energia em forma de energia potencial. Um sistema vibratório ainda pode ter um amortecedor, onde este é um meio de perda gradual de energia (INMAN, 2018).

2.5.2 Sistema massa-mola

O sistema vibratório mais simples é o massa-mola (Figura 3), onde é um sistema denominado de um grau de liberdade, pois a coordenada x é suficiente para representar sua posição em qualquer tempo. Como no sistema não há nenhuma força externa aplicada, após a perturbação inicial o sistema terá um movimento de vibração livre. E também, devido a não possuir um sistema de amortecimento ou dissipação de energia, a amplitude se mantém constante durante o movimento (sistema não amortecido) (Rao,2009).

Figura 3 - Sistema Massa-Mola



Fonte: (RAO, 2009)

Considerando um diagrama de corpo livre do sistema da Figura 3, com a mola de massa desprezível, e que a massa do corpo é m , a rigidez da mola k . Além disso, assume-se que a única força atuante é a força da mola, e que a massa se

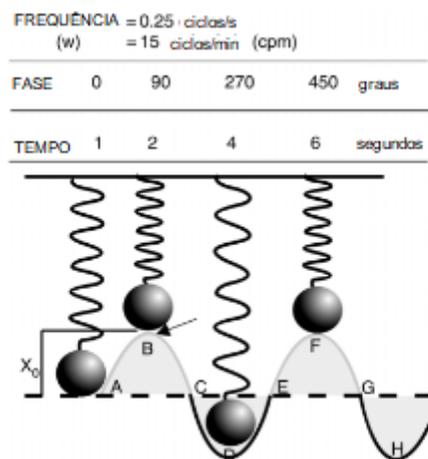
movimento sem atrito sobre uma superfície na direção x , ou seja, x é o deslocamento da massa. O somatório das forças na direção x é

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) \quad (2.1)$$

onde $\ddot{x}(t)$ é a derivada de segunda ordem do deslocamento (INMAN, 2018).

Podemos então estudar o movimento do sistema massa-mola ilustrando em um gráfico o seu movimento, Figura 4, da massa com o seu respectivo tempo.

Figura 4 - Gráfico do movimento do sistema Massa-Mola



Fonte: (Adaptado de SCHEFFER & GIRDHAR, 2004)

Segundo Inman (2018), da experiência observando uma mola, como na Figura 4, supõe-se que o movimento é periódico, da forma

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.2)$$

a função seno é escolhida pois essa descreve a oscilação. Assim, temos que A é a amplitude, ω_n é a frequência natural angular e o ϕ é a fase.

A velocidade obedece ao movimento oscilatório do deslocamento, portanto diferenciando a Equação (3.1) temos

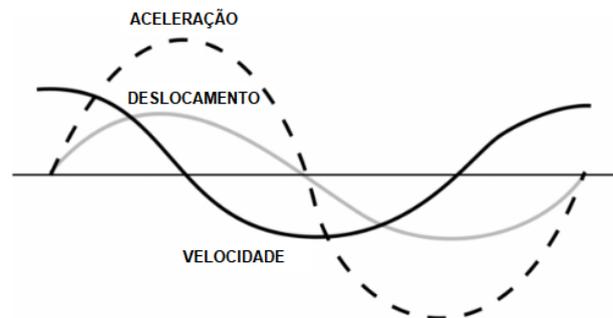
$$\dot{x}(t) = \omega_n A \cos(\omega_n t + \phi) \quad (2.3)$$

e a aceleração pode ser dada por

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.4)$$

podemos observar que na Figura 5 é apresentado as curvas correspondentes ao deslocamento, velocidade e aceleração onde a velocidade é uma curva do cosseno enquanto as demais do seno, conforme observados nas Equações 2.2, 2.3 e 2.4.

Figura 5 - Curvas da aceleração velocidade e deslocamento.



Fonte: (Adaptado de SCHEFFER & GIRDHAR, 2004)

Substituindo as Equações 2.2 e 2.4 em 2.1

$$-m\omega_n^2 A \sin(\omega_n t + \phi) = -kA \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.5)$$

dividindo por A e m a equação é satisfeita quando

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

A constante ω_n é a solução da equação do movimento, e caracteriza a frequência com que o movimento se repete e então é denominada *frequência natural do sistema*.

2.5.3 Perfis de vibração

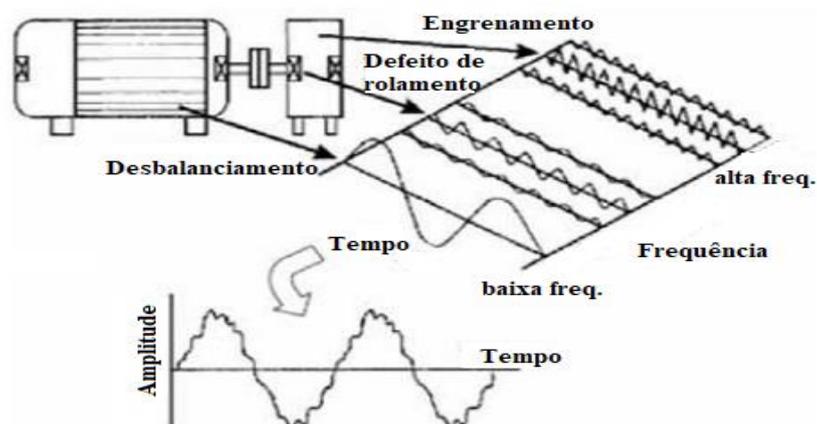
Segundo Mobley, 1999, a análise de vibração requer a união de dados muito complexos, que depois são decifrados. Devido a normalmente existirem diversas fontes de vibração, e cada uma dessas representa sua própria curva, os sinais são somados e apresentam um perfil composto por todas as fontes e estes podem estar representados no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

2.5.3.1 Domínio do Tempo

Quando os dados são dispostos no gráfico da amplitude contra o tempo estes estão, portanto, no domínio do tempo. São utilizados principalmente para equipamentos de funcionamento linear como, por exemplo, sistema de portões e esteiras. São bastante uteis para verificar mudanças nas condições de operação. Contudo, os dados no domínio do tempo são difíceis de usar, devido a este tipo de gráfico mostrar o sinal de todas as fontes de vibrações, o que dificulta visualizar a contribuição singular de cada fonte.

A forma de análise das ondas se dá por comparação com as ondas previamente coletadas, e observadas por impulsos repetidos que podem representar as frequências de rolamentos, engrenagens e dos demais componentes. Na Figura 6 é possível ver que a amplitude da onda referente ao desbalanceamento, se sobrepõe sobre as demais como por exemplo, as de engrenagens e rolamentos (GREEN, 2003).

Figura 6 - Sinal Vibratório no domínio do Tempo



Fonte: (GREEN, 2003)

Pode-se dividir ainda os elementos vibratórios em função da sua forma de repetição em: vibrações periódicas que são as que se repetem em determinado período de tempo, vibrações aleatórias, imprevisíveis quanto ao seu valor instantâneo para qualquer instante de tempo futuro, e ainda vibrações transitórias, que existem apenas em determinado espaço de tempo sendo nula nos demais.

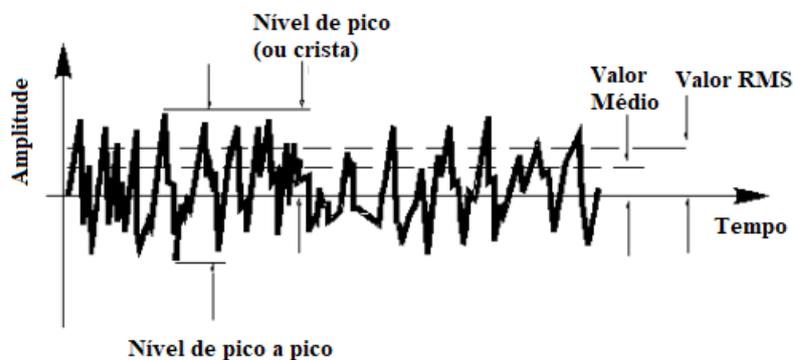
Uma forma de minimizar os problemas comentados acima da análise de sinais pelas amplitudes e frequências, é a definição de algumas medidas que nos permite o cálculo de valores quantitativos globais para um movimento $x(t)$ qualquer, descrito no domínio do tempo. Estes são valor eficaz médio, valor médio, fator de forma e fator de crista, dados pelas equações dispostas no Quadro 1. Na Figura 7 estão apresentados os valores globais de vibração para um sinal de vibração complexo.

Quadro 1 - Valores quantitativos globais

Valor eficaz ou Valor RMS (X_{RMS})	$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt}$	(2.7)
Valor médio (X_m)	$X_m = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$	(2.8)
Fator de forma (F_f)	$F_f = \frac{X_{RMS}}{X_m}$	(2.9)
Fator de crista (F_C)	$F_C = \frac{X_{pico}}{X_{RMS}}$	(2.10)

Fonte: (Adaptado de ARATO, 2004).

Figura 7 – Valores globais de medida de vibração



Fonte: (ARATO, 2004)

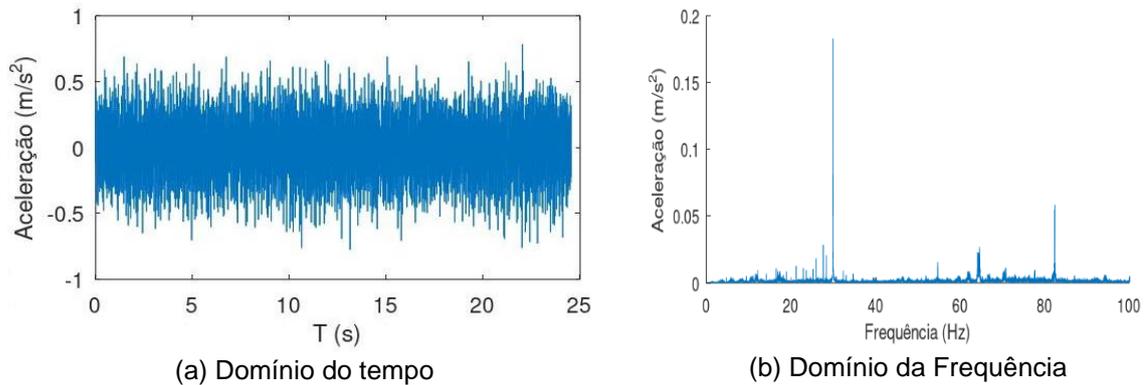
Valores altos de crista indicam a presença de picos elevados, o que pode indicar que o sinal contém componentes harmônicas elevadas, um sinal que não é puramente senoidal. Já, um fator de forma próximo de $\sqrt{2}$ indica um sinal com forma senoidal mais pura, e com componentes harmônicos menores em relação ao componente fundamental (ARATO, 2004).

2.5.3.2 Domínio da Frequência

Dados no domínio da frequência são obtidos através da conversão dos dados no domínio do tempo através da Transformada de Fourier (FT). A FT permite que cada componente da vibração seja expressa como um pico de frequência. A amplitude no domínio da frequência pode ser entendida como o deslocamento por unidade de tempo relacionado a uma determinada frequência, onde o eixo da aceleração Y da ordenada e a frequência no eixo X da abscissa. Como o eixo X é frequência normalizada à velocidade de funcionamento, a mudança de velocidade não afeta os dados do gráfico, contudo, a amplitude sim pode ser diferente, esse sinal no domínio da frequência é chamado de espectro de frequência, na Figura 8a tem-se o gráfico do domínio do tempo, já na Figura 8b, é representado o gráfico no domínio da frequência (MOBLEY, 1999).

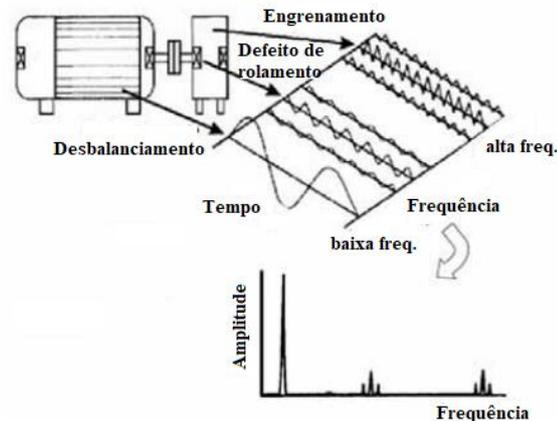
Na Figura 9 é possível observar que cada onda corresponde a 1 pico de frequência. O desbalanceamento, por exemplo, produz um sinal com a amplitude mais alta e com menor frequência, já os problemas relacionados aos rolamentos são de alta frequência e baixa amplitude e os sinais de baixa amplitude são relacionadas as frequências de engrenamentos a qual é determinada pelo número de dentes nas engrenagens.

Figura 8 - Diferença entre gráfico domínio do tempo e domínio da frequência



Fonte: (AUTOR, 2023)

Figura 9 - Sinal vibratório no domínio da frequência



Fonte: (GREEN, 2003)

2.5.4 Transformada de Fourier e obtenção do espectro

Atualmente a transformada de Fourier é uma técnica comumente utilizada em analisadores de vibração. Os princípios básicos desta foram determinados por Fourier (matemático francês), em 1882, onde demonstrou que qualquer sinal periódico pode ser segregado em uma série de vibrações harmônicas individuais computadas por amplitude e fase (LAGO, 2007).

Tempo depois, a integral de Fourier foi deduzida permitindo a transformação de sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência. A partir de n amostras do sinal no domínio do tempo, calcula o espectro de frequências composta por m valores distintos. A transformada é expressa por:

$$X(m) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a} x(n) e^{-i2\pi x \left(\frac{nm}{N_a}\right)} \quad (2.11)$$

em que: $X(m)$ é o resultado da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) de um sinal discretizado no domínio do tempo com m bandas discretas e $N_a = a.m$, é o número de amostras a serem coletadas, (ALMEIDA, 1990).

O algoritmo e as técnicas computacionais a quais a análise FFT foi desenvolvida, conhecidas desde 1965, são a base dos instrumentos de análise modernos. Os equipamentos baseados em microprocessadores conseguem lidar esse algoritmo em alta velocidade. Na FFT, uma pequena seção é extraída do sinal do tempo, janela de tempo, e o espectro de frequência então é calculado utilizando a FFT. O instrumento então durante a aplicação do algoritmo assume que o sinal nesta janela de tempo é continuamente periódico (LAGO, 2007).

Por se tratar de algoritmo este pode ser aplicado em *softwares* matemáticos como o caso do *Octave*. Então para este estudo é escrito um algoritmo baseado na FFT, o que permite além de calcular, traçar os gráficos de maneira rápida.

2.5.5 Densidade Espectral de Potência (PSD)

Densidade espectral de potência (*Power Spectral Density*) é uma função determinística no tempo, possui dimensão de energia por Hertz (BRENDOW et al, 2018). Auxilia na captura de frequência de uma função determinada no tempo, e identifica periodicidades. Esta possui grande relação com a teoria de Fourier, onde o PSD é definido pela aplicação da transformada de Fourier, na qual descreve a distribuição da variância de um processo no domínio da frequência. E com a aplicação da função PSD é possível uma melhor identificação das frequências dominantes no espectro.

Para o caso de vibrações o sinal é obtido no domínio do tempo e em seguida transformado para o domínio da frequência utilizando-se a transformada de Fourier, ou seja, representa-se o sinal por uma soma de exponenciais complexas. A aplicação do PSD sobre um sinal no domínio da frequência é obtido através da Equação 2.12. Se $f(t)$ é um sinal de aceleração, o PSD é expresso em $(m/s^2)^2$ (FERNANDES et al, 2019).

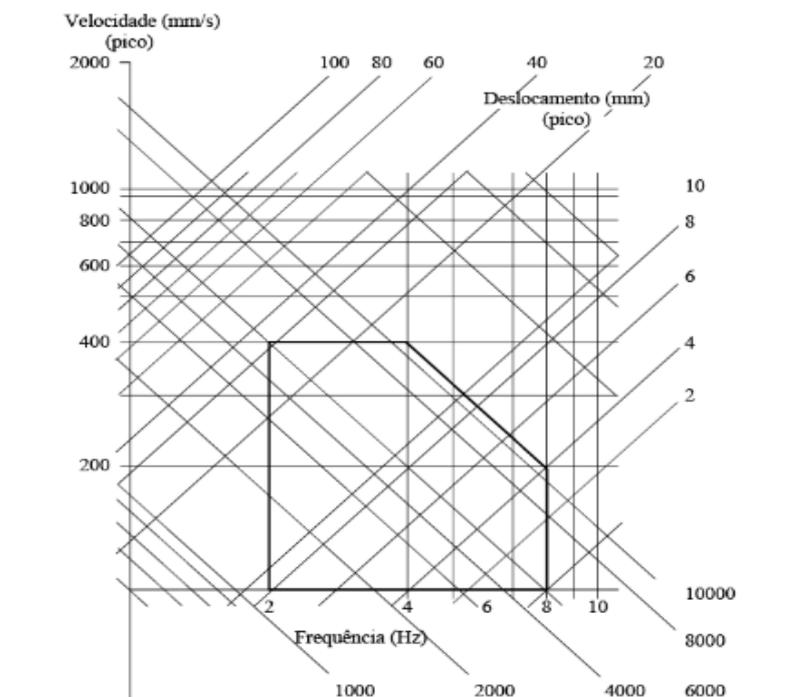
$$PSD = \frac{1}{\pi} |F(\omega)|^2 \quad (2.11)$$

2.6 FAIXAS DE TOLERÂNCIA DE VIBRAÇÕES

As faixas de vibração são determinadas no momento do projeto de uma máquina conforme a ISO (*Internacional Organization for Standardization*). Contudo durante a sua vida útil, pode ocorrer mudanças em sua vibração, devido por exemplo, ao deterioramento de engrenagens e manutenção incorreta.

A ISO fornece um padrão de como medir a vibração e seus níveis aceitáveis, o que facilita a comunicação entre fabricantes e consumidores. Estes são estabelecidos através do valor eficaz ou valor quadráticos médios (*RMS*) de deslocamento, velocidade e aceleração. Uma forma de utilizar de maneira prática é a utilização desses valores estabelecidos pela norma através do nomograma expresso na Figura 10. E este é uma representação gráfica da relação entre aceleração, deslocamento, velocidade e frequência de um sistema de 1 grau de liberdade não amortecido.

Figura 10 - Exemplo de nomograma



Fonte: (INMAN, 2001).

3 MOTOREDUTOR

Um dos equipamentos mais críticos em uma planta industrial é o motoredutor, e então aqui é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o mesmo. Nos dias atuais o uso de redutores é bastante necessário, pois a maioria das máquinas industriais exigem a utilização de altos torques e velocidades específicas. Assim, o redutor utilizado junto ao motor elétrico tem como objetivo, na maioria dos casos, reduzir a velocidade do motor e conseqüentemente aumentar o torque do mesmo.

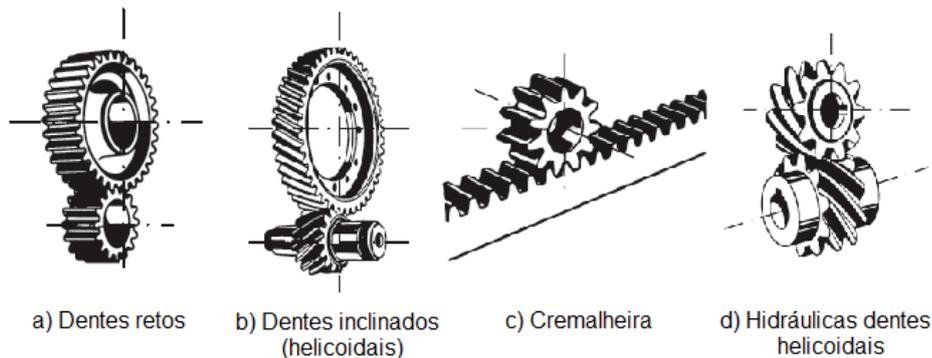
Esse mecanismo é constituído essencialmente de um conjunto de engrenagens, um eixo, rolamentos, chavetas e a caixa que além de proteger o conjunto é onde se é depositado o óleo lubrificante.

3.1 TIPOS DE ENGRENAGENS

Os tipos de engrenagens são determinados em projeto onde é considerado com clareza suas condições de funcionamento, a sua adequação segundo a melhor disposição construtiva, e seu custo comparando com outras possíveis soluções. Com isso a primeira comparação que se pode fazer é relativa ao posicionamento de seus eixos, podendo ser com eixos paralelos, eixos que se cortam ou ainda, eixos que se cruzam. Entretanto cada tipo, atenderá determinadas velocidades e faixas de potência, abaixo estão apresentados os 3 grupos de engrenagens e suas características (FILHO, MARCO S., 2017).

Engrenagens Cilíndricas: podem ser divididas em 2 grupos, com eixos paralelos e com eixos cruzados. As que possuem eixo paralelos são as de dentes retos (Figura 11 (a)), dentes inclinados (Figura 11 (b)) e a cremalheira (Figura 11 (c)), estas têm como características, poderem ser montadas com um ou mais pares engrenados, ter relação de transmissão máxima por par de 1:8, potências da ordem de 20.000–25.000 CV com velocidades tangenciais de até 150-200 m/s e apresentam alto rendimento 95-99%. Já as que possuem eixos cruzados, hidráulicas de dentes helicoidais (Figura 11 (d)), tem como características, utilização na transferência de pequenas potências e pequenas distâncias de centro a centro, apresentam rendimento próximo das engrenagens cilíndricas helicoidais e aplicam-se para relação de multiplicação de até 1:5.

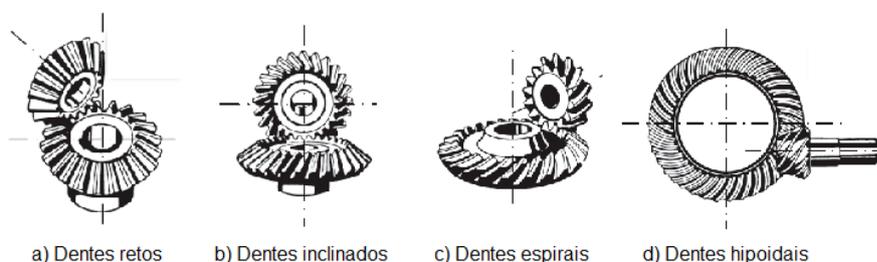
Figura 11 - Engrenagens Cilíndricas



Fonte: (FILHO, MARCO S., 2017)

Engrenagens Cônicas: possuem a classificação quanto ao tipo de dentes, são estas engrenagens de dentes retos (Figura 12 (a)), dentes inclinados (Figura 12 (b)), dentes espirais (Figura 12 (c)) e dentes hipoidais (Figura 12 (d)), estas possuem eixos que se cortam com exceção das hipoidais que possuem eixos reversos ou com deslocamento. As engrenagens cônicas são empregadas quando há a necessidade de cruzamento de eixos. Podem atingir relações de multiplicação de 1:6, podem ser montadas no sistema com outros pares de engrenagens cilíndricas retas, com o intuito de melhorar a capacidade de carga e ainda o rendimento, atenuando o problema de ruído, utilizam-se dentes espirais ou hipoidais (com deslocamento). O seu rendimento é comparável ao rendimento das engrenagens cilíndricas.

Figura 12 - Engrenagens Cônicas

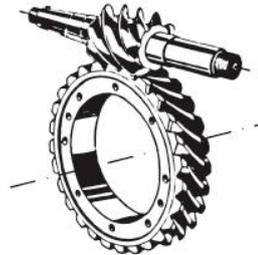


Fonte: (FILHO, MARCO S., 2017)

Engrenagens Coroa Sem Fim: possuem eixos cruzados e são utilizadas para grandes relações de transmissão que podem variar de 1:10 até 1:100, contudo, apresentam baixos rendimentos variando de 45% até 95%. Podem transmitir

potências de até 1000 CV, com velocidades tangenciais máximas de 60-70 m/s aproximadamente (Figura 13).

Figura 13 - Engrenagem Coroa Sem Fim



Fonte: (FILHO, MARCO S., 2017)

3.2 FALHAS EM ENGRELAGENS

Segundo Errichello R. L. e Muller J. (2002) falhas severas podem estar presentes em engrenagens e são demonstradas a seguir as quatro principais falhas encontradas e suas causas.

Fadiga por Flexão: este tipo de defeito ocorre de forma progressiva e lenta, ocasionada por carregamento repetitivo, ocorre em três estágios. O primeiro ocorre devido a áreas de concentradoras de tensão ou descontinuidades, podem ser ocasionadas, por exemplo, inclusões, rachaduras de caráter microscópicas. Depois o segundo estágio é a propagação das rachaduras cresce de perpendicular a máxima tensão de tração. E por fim quando a rachadura cresce suficientemente ocorre a fratura.

Fadiga por Contato: destacamento de fragmentos de metais na superfície do dente de contato, que ocorrem devido a estresses repetidos e podem ocorrer de forma tanto macroscópica quanto microscópica. A macroscópica ocorre quando as rachaduras começam logo na superfície ou abaixo dela. As microscópicas têm um fosco ou aparência de cinza manchado, com equipamentos é possível ver covas finas e essas podem ser mais profundas que os poços.

Desgaste: ocorrem devido a ação mecânica, química ou elétrica, e estes provocam a remoção ou deslocamento de material. Os principais tipos são adesão, abrasão e polimento. Adesão é a transferência de material da superfície de um dente para a do outro, ocorre devido a soldagem ou arranhões. A adesão pode ser

classificada como moderada ou severa. A abrasão é causada devido a contaminantes existentes no lubrificante, como cavacos de usinagem, ferrugens, entre outros. O polimento por fim é uma abrasão em escala fina, e que tem como resultado um acabamento espelhado na superfície do dente, ocorre devido a agentes quimicamente ativos lubrificantes que estão contaminados com materiais abrasivos finos.

Arranhões: se dá devido a adesão server ou arranhões, que gera a transferência de metal da superfície de um dente para outro. Ocorrem em bandas ao longo da direção de deslizamento, geralmente no adendo (distância radial entre o topo do dente e o círculo primitivo) ou dedendum (distância radial do fundo do dente ao círculo primitivo), contudo os arranhões localizados podem surgir devido a concentrações de carga.

3.3 ESPECTROS DE VIBRAÇÃO

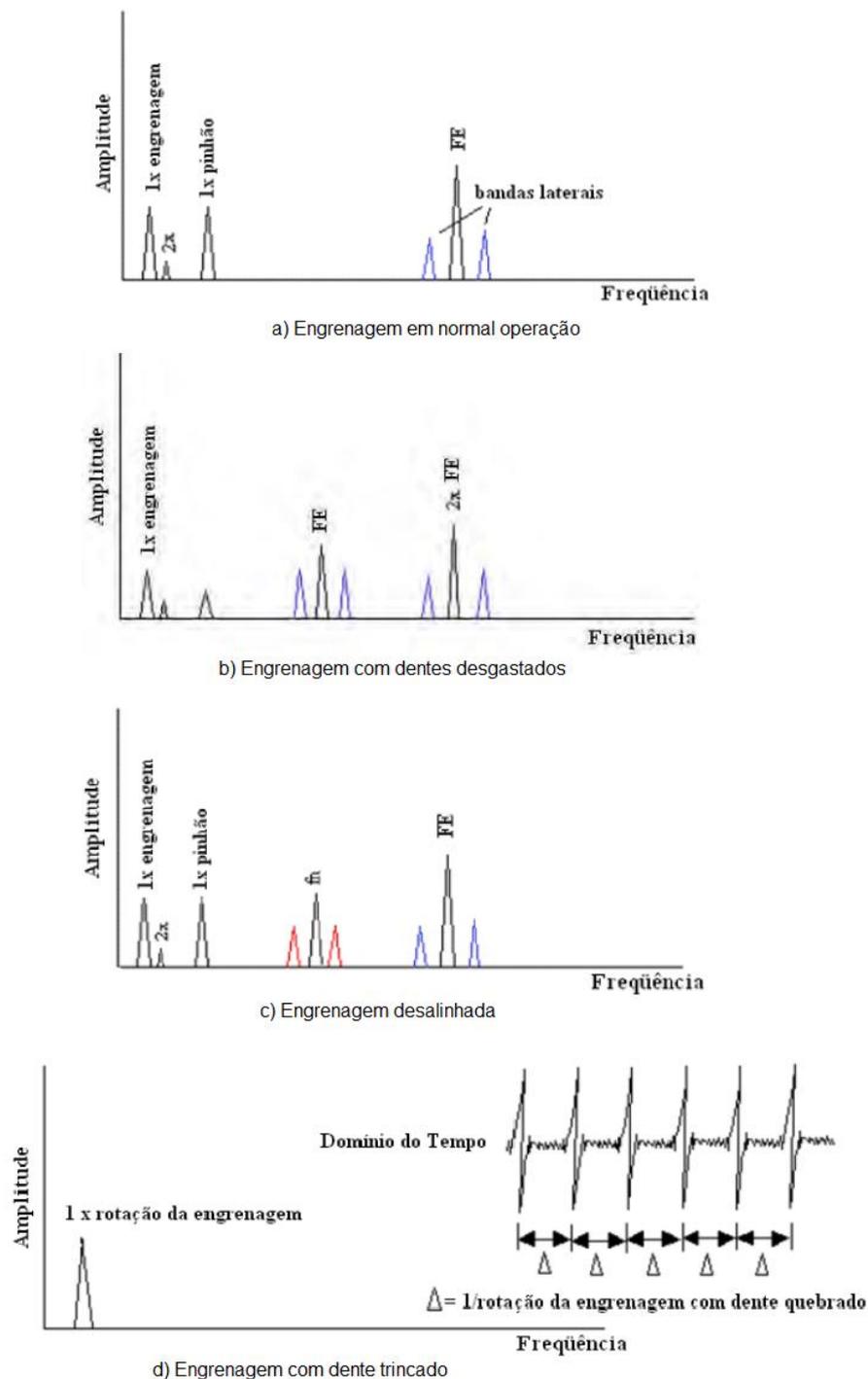
Avaliar espectros de frequência nos permite monitorar o estado de conservação do equipamento, em redutores de velocidade o monitoramento contínuo do espectro de frequência pode identificar segundo Lago (2007), os seguintes:

- Acoplamento impróprio dos dentes
- Excentricidade das engrenagens, este inclui: engrenagens com altura dos dentes desiguais, largura dos dentes desiguais, etc.
- Engrenagens montadas em eixos curvados.
- Relaxamento, incluindo: relaxamento da engrenagem ou do rolamento o eixo e/ou caixa.
- Excessivas marcas nas engrenagens.
- Engrenagem quebrada, emissão de barulho ou lascamento dos dentes.

A multiplicação do número de dentes de um engrenamento pela rotação do eixo da engrenagem nos dá a sua frequência que nos permite avaliar os problemas desses.

Um exemplo comparativo de espectros é demonstrado na Figura 14 a seguir, onde a frequência de engrenamento é demonstrada por FE (n° de dentes multiplicado pela rotação) e fn é a frequência natural da engrenagem.

Figura 14 - Comparação entre espectros de frequência



Fonte: (Adaptado de LAGO, 2007)

Na figura acima, a imagem (a) representa o espectro de frequência de uma engrenagem com dentes retos em normal operação, (b) apresenta o espectro de uma engrenagem com o dente desgastado e nas demais (c) e (d) apresentam respectivamente uma engrenagem desalinhada e uma engrenagem com dente

trincado, porém em d a imagem é representada também no domínio do tempo, pois neste é possível ver o que no momento em que o dente quebrado entra em contato com a outra engrenagem é que acontece a vibração, o que não podia ser percebido no gráfico da frequência.

3.4 FONTES DE VIBRAÇÃO

As fontes de vibração em redutores podem ser classificadas em 3 tipos segundo Cunha (2005 apud LAGO,2007):

Síncronas e harmônicas: relacionadas ao desalinhamento dos eixos e as excentricidades dos engrenamentos.

Não síncronas: devido ao atrito e danos na linha primitiva das engrenagens.

Impactos repetidos: tem causa com danos em rolamentos e dentes, causam respostas ressonantes em volta das frequências naturais do sistema.

As frequências de giro dos eixos e a frequência de engrenamento, são as frequências de interesse para análise das fontes de vibrações sincronizadas de um redutor de velocidade de engrenagens. No Quadro 2 é apresentado as principais frequências que podem ser encontradas em redutores, bem como a sua causa e a forma de identificação.

Quadro 2 - Tipos de frequência, suas causas e sua identificação

	Causa	Identificação
Frequência de Giro dos Eixos	Sempre presente, devido ao movimento de rotação dos eixos	Valor igual a rotação dos eixos presentes em giros por segundo
Frequência de Engrenamento	Para cada par de engrenagens existe uma frequência associada	Frequência de engrenamento calculada pelo produto do número de dentes da engrenagem pela frequência de giro do eixo a qual ela está acoplada.
Atrito	Apresentam composição complexa e são identificadas pelo barulho que produzem e são ocasionados devido a problemas principalmente em rolamentos	Presença de barulho apresenta irregularidade
Harmônicos de Frequência de Engrenamento	Devido a desvio dos dentes, normalmente causados por desgaste desigual ou deformação	Apresenta frequências de baixa amplitude
Danos e Dentado	Normalmente associado a perda localizada de rigidez do dente defeituoso, devido a trincas e quebras de dentes	Mudança na amplitude e fase do sinal de vibração no período de engrenamento do dente defeituoso

Fonte: (Adaptado de LAGO (2007)).

A seguir são elencados ainda, alguns defeitos e suas causas sobre a vibração do equipamento.

3.4.1 Desbalanceamento

A vibração devido ao desbalanceamento é bem determinada, sua frequência corresponde com a frequência de rotação do seu eixo e possui a componente predominante na direção radial. Já sua amplitude é dada de forma proporcional à quantidade de desbalanceamento e ao quadrado da rotação. Tem-se como principais causas, fabricação deficiente, desgaste, manutenção incorreta, impregnação de materiais, armazenagem, transporte e etc. (LAGO, 2007).

3.4.2 Desalinhamento

É um problema muito comum, que as vezes é desprezado, devido ao fato que em montagens mecânicas há mais de um eixo, além de mancais e acoplamentos. Devido ao movimento os componentes entram em contato gerando vibração radial com frequência igual ao giro do eixo, e pode gerar harmônicos, ou seja, frequências iguais ao dobro ou triplo da velocidade de rotação. Apresenta também frequências na direção axial de mesma composição de frequências. Esta última, a componente axial é o que nos possibilita diferenciar vibrações de causas do desalinhamento das causadas por desbalanceamento, devido ao desbalanceamento não possuir componentes na direção axial (ARATO,2004 apud LAGO, 2007).

3.4.3 Eixo Torto e Rolamentos Inadequados

Segundo Arato (2004 apud Lago, 2007), a existência de um eixo defletido causa uma vibração com frequência cujo valor é o dobro da frequência de rotação do eixo. Os defeitos em rolamentos geram frequências típicas da forma não síncrona, ou seja, não são múltiplos inteiros da velocidade de rotação do eixo.

3.5 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO SINAL NO MOTOREDUTOR

Nesta seção são apresentados separadamente como medir vibrações utilizando alguns trabalhos como exemplo, e a definição de alguns elementos utilizados para a aquisição e processamento dos sinais medidos.

3.5.1 Medição de Vibração

A análise de vibração depende principalmente da aquisição de dados, que necessita ser feita de maneira correta. Assim é possível ter dados confiáveis e que nos permitam a execução de uma análise precisa.

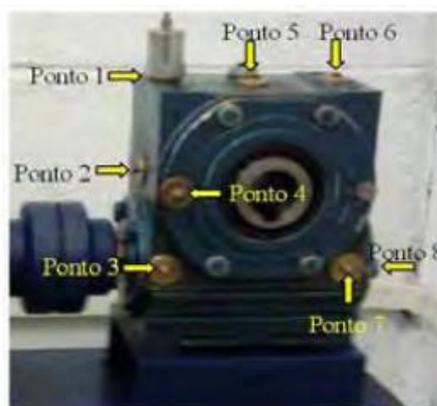
As máquinas emitem vibração quando entram em movimento, ou seja, tem suas vibrações correlacionadas a velocidade de rotação. Segundo Lago (2007) o que liga as partes rotativas e as partes fixas de uma máquina são os mancais de

apoio dos rotores. Logo, as vibrações excitadoras passarão pelo rotor e irão para a carcaça passando pelo mancal e suas características são internas e externas. Com isso os pontos de medição devem ser selecionados de modo que a rota de transmissão seja a mais curta e rígida possível. O autor ainda sugere que as caixas dos mancais sejam apropriadas para medição e que os pontos de medição sejam planos, limpos e livres de óleos e o sensor não deve balançar, ou seja, estar firme. Em seu experimento Lago posiciona os acelerômetros conforme a Figura 15, contudo dos pontos mostrados foram utilizados apenas os pontos 2, 3, 5 e 7.

Al-Arbi, 2012 propôs uma outra forma de posicionamento dos acelerômetros, onde ele analisou um conjunto de motoredutor, e posiciona dois sensores, o primeiro na caixa de engrenagem onde se tem uma superfície plana e pode ser montado de forma simples com fixação por cola ou parafuso (Figura 16), e o segundo sensor é montado no lado do motor perto do flange que une o motor e a caixa de engrenagem, neste caso o espectro corresponde a caixa de engrenagem terá uma amplitude menor, tendo destaque a vibração do motor.

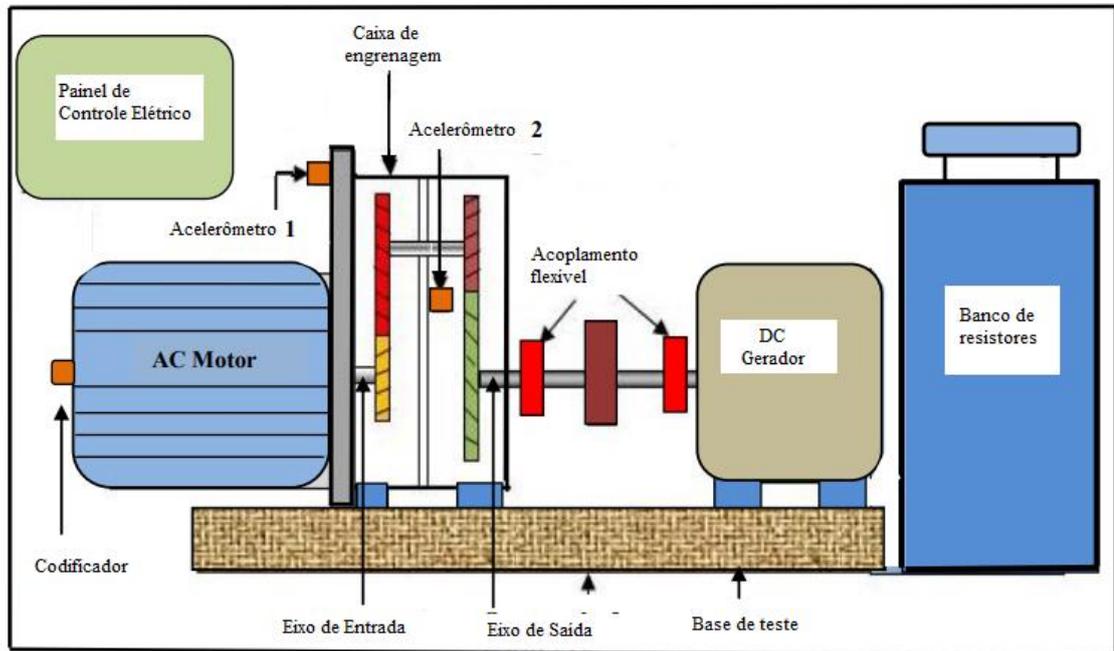
Martello, 2020 utilizou um modo de aquisição diferente aos citados acima, em seu trabalho utiliza o acelerômetro existente no *smartphone* Motorola Moto G7 Power, utilizando o aplicativo *Physics Toolbox Sensor Suite*. E com isso ele mede a aceleração nos 3 eixos, o telefone foi acoplado a caixa de engrenagens através de um suporte feito de plástico (Figura 17).

Figura 15 - Posicionamento dos Acelerômetros para Adquirir Sinais de Vibração



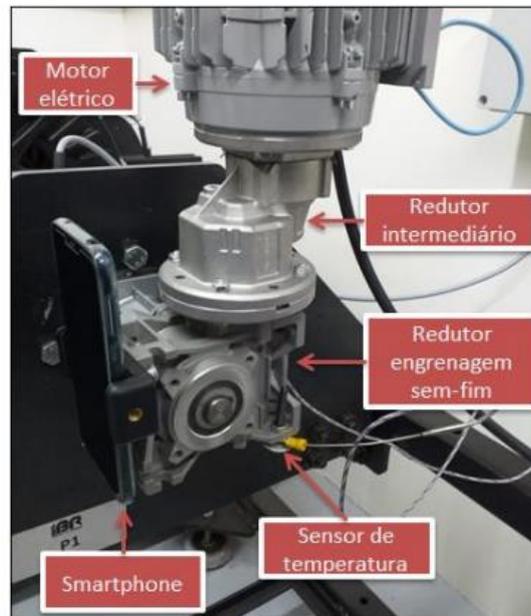
Fonte: (LAGO, 2007)

Figura 16 - Exemplo do Posicionamento dos Acelerômetros



Fonte: (Adaptado AL-ARBI, 2012)

Figura 17 – Acoplamento do *smartphone* em Redutor



Fonte: (MARTELLO, 2020)

3.5.2 Transdutor

Em ambos os trabalhos foram utilizados transdutores, que convertem movimento mecânico em sinal elétrico ou magnético, neste caso foram utilizados Transdutor do tipo acelerômetro. O acelerômetro produz uma voltagem proporcional ao movimento, velocidade ou aceleração da vibração, funciona pelo princípio piezelétrico. Tem como princípio de construção um cristal piezelétrico e uma massa normalizada em uma caixa de metal. E devido a massa aplicar força no cristal esse reage produzindo uma carga elétrica proporcional a aceleração, contudo possuem um alto custo (LAGO, 2007).

Entretanto, os acelerômetros com sistemas micro eletromecânico (MEMS) vem tendo um aumento em seu uso para aplicações de engenharia. Este sistema se caracteriza por possuir um tamanho menor e baixo custo comparado ao mencionado anteriormente. Além de possuírem outras funcionalidades, como medição de temperatura, pressão, aceleração e umidade. Os MEMS podem funcionar tanto pelo princípio piezoresistivo ou por capacitor, sendo o primeiro o mais utilizado atualmente. Estes possuem também um baixo consumo de energia, o que permite a utilização em dispositivos que funcionam de forma remota, e devido a possibilidade de integração com o microcontrolador Arduino como um sistema de aquisição, torna sua aplicação simples e eficaz (M. VARANIS ET AL., 2018).

3.5.3 Sistema de Conversão Analógico/Digital e Software de Aquisição

Os sistemas de conversão, pegam o sinal analógico do condicionador e convertem em sinal digital. Este condicionamento pode conter amplificação, filtragem, aplicações diferenciais, isolamento, amostragem simultânea e retenção e outros (LAGO, 2007).

Os softwares de aquisição são responsáveis principalmente por pelo processamento numérico, armazenagem e transferência de dados. *Softwares* e programas de análise de sinais, são baseados no algoritmo da Transformada Rápida de Fourier e possuem também ferramentas gráficas para a visualização dos sinais (LAGO, 2007).

4 METODOLOGIA

Este trabalho se baseia no histórico de manutenção da empresa Dickow Alimentos Ltda. e também no referencial teórico apresentado. A partir destes são executadas as seguintes etapas listadas abaixo:

- a) Estudo da Planta
- b) Cadastro de Equipamentos
- c) Estudo Preliminar de Vibrações
- d) Aquisição dos Sinais de Vibração
- e) Processamento dos Sinais
- f) Análise dos Dados

A seguir, cada etapa é apresentada em detalhes.

4.1 ESTUDO DA PLANTA

Nesta etapa para o mapeamento dos equipamentos na planta base é feita a localização presencial, a fim de saber onde estava cada equipamento da área de secagem da empresa. Com a localização de todos os equipamentos, é definido de forma a segregar os equipamentos uma cor para cada grupo de máquinas, apresentadas na Figura 18. Após a segregação em grupos, os equipamentos são desenhados na planta base utilizando-se o *software AutoCAD*.

4.2 CADASTRO DE EQUIPAMENTOS

Com todos os equipamentos localizados e segregados em grupos, o cadastro foi realizado em uma planilha eletrônica, onde são definidos os nomes de identificação, sendo EL para elevadores, RT para roscas transportadoras, SV para silo de arroz verde, SS para silos de arroz seco, P para peneira, FM para filtro de manga e SEC para secador. Nesta planilha são inseridas informações importantes, como rotação de saída do motoredutor, capacidade, modelo e etc.

Com todos os dados, o próximo passo foi a execução de uma pesquisa interna, em documentos digitais e entrevista com os funcionários do setor de manutenção e produção, que forneceram as informações listadas abaixo. Junto ao chefe de manutenção da empresa, é identificado a caixa de engrenagem, motoredutor SEW (Fig. 19), como sendo a de maior importância para o pleno funcionamento da empresa, durante o período de maior produção que é durante a safra do arroz. Os resultados obtidos das pesquisas são:

- Período: durante a safra
- Local: área de secagem do arroz
- Máquina: roscas transportadoras
- Componente: motoredutor

Figura 19 - Motoredutor SEW



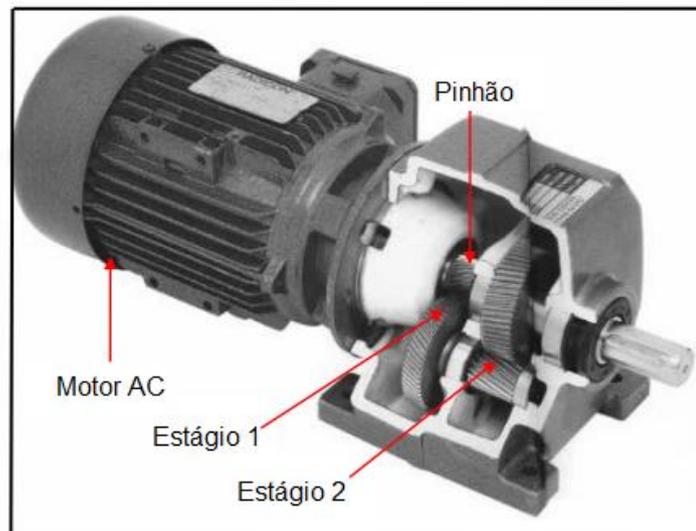
Fonte: (AUTOR)

4.3 ESTUDO PRELIMINAR DE VIBRAÇÕES

Nesta etapa foi realizado um estudo preliminar, onde a partir da literatura foi obtido uma previsão das vibrações que iremos observar no espectro de frequência adquirido.

Com isso, primeiro são definidos o conjunto motor e redutor de velocidades SEW R77 e R67. É apresentado na Figura 20 o desenho esquemático do conjunto motoredutor, onde são apresentados os dois estágios de redução, feitos através dos conjuntos de engrenagens helicoidais.

Figura 20 - Esquema do Conjunto motoredutor



Fonte: (ADAPTADO DE AL-ARBI, 2012)

Além da frequência de entrada do motor podemos calcular os harmônicos das frequências fundamentais, as frequências fundamentais são obtidas pela multiplicação do número de dentes e da frequência de rotação do eixo nos quadros abaixo esta é representada como frequência de rotação do conjunto. Os valores de frequência do primeiro, segundo e terceiro eixo rotacional (Conforme Al-Arbi, 2012): f_{r1} , f_{r2} e f_{r3} são determinados por:

$$f_{r1} = \frac{\text{Rotação do Motor}}{60\text{sec}} \quad (4.1)$$

$$f_{r2} = f_{r1} * \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) \quad (4.2)$$

$$f_{r3} = f_{r2} * \left(\frac{Z_3}{Z_4}\right) \quad (4.3)$$

E para o conjunto do primeiro e segundo estágio são definidas por:

$$f_{m11} = f_{r1} * Z_1 \quad (4.4)$$

$$f_{m21} = f_{r1} * Z_3 \quad (4.5)$$

Onde: Z_1 = número de dentes no pinhão no primeiro estágio.

Z_2 = número de dentes na engrenagem movida no primeiro estágio.

Z_3 = número de dentes no pinhão no segundo estágio.

Z_4 = número de dentes na engrenagem movida no segundo estágio

f_{m11} = frequência da malha de engrenagens no primeiro estágio

f_{m21} = frequência da malha de engrenagens no segundo estágio

4.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Nesta fase então, foi apresentado os métodos e materiais utilizados para aquisição dos dados, seu processamento e então é feito uma análise dos sinais obtidos para a obtenção dos resultados.

4.4.1 Dispositivos para aquisição dos dados

Foi utilizado dois sistemas de aquisição de dados, sendo primeiro utilizado o *Smartphone Galaxy A8 (2018)* da *Samsung* e com o objetivo de comparar a capacidade de medição e custos do telefone utilizado, é escolhido a plataforma Arduino para aquisição, devido a sua grande utilização em diversos trabalhos como em Hjort et al., 2015. A seguir é apresentada a lista dos equipamentos utilizados.

Smartphone: o telefone possui em seu interior um acelerômetro do tipo MEMS similar ao utilizado em diversos estudos com Arduino. É utilizado o telefone

Galaxy A8 (Fig. 21) que possui um acelerômetro com capacidade de leitura de até 200 Hz, ou de 0,005 s.

Figura 21 – Smartphone Galaxy A8 (2018)



Fonte: (SAMSUNG, 2022)

Arduino: Arduino é um microcontrolador de código aberto (open source), e este é bem popular entre os estudantes e profissionais. Sua comunidade é bastante ativa e o seu baixo custo, faz deste uma excelente ferramenta para testar e desenvolver projetos. Para o seguinte trabalho foi escolhido o modelo Uno SMD R3 mostrado na Figura 22 abaixo. O Arduino Uno SMD R3, é baseado no Atmel ATmega328 microcontrolador, esta placa contém 14 pinos digitais I/O (input/output), e pode ser ligado por uma bateria externa, ou diretamente no computador via USB.

Figura 22 - Placa Uno SMD R3 Atmega328



Fonte: (CASA DA ROBÓTICA, 2022)

Sensor: para a mensuração da vibração, é utilizado o acelerômetro que é um dispositivo capaz de mensurar a aceleração na qual são submetidos. O

acelerômetro MEMS utilizado foi o MPU-6050, que é capaz de medir desde pequenas até grandes acelerações com grande precisão, tendo taxa de aquisição de 400 Hz ou de 0,0025 s. O MPU-6050 é um acelerômetro triaxial que pode ser programado para medir vibrações desde 2g a 16g (fonte: datasheets do modelo). O acelerômetro é montado na placa GY521 (Figura 23), a placa além de contar com um acelerômetro possui também um giroscópio, para filtrar o sinal a placa conta com um capacitor e um led que funciona como indicador de funcionamento, além de um regulador de voltagem para que o mesmo possa trabalhar com a mesma voltagem da placa Arduino (5V).

Figura 23- Placa GY521



Fonte: (GNS COMPONENTS, 2022)

Bateria: para o fornecimento de energia ao conjunto é utilizado uma bateria de 9V devido a utilização do mesmo ser em um ambiente fabril, o que dificulta a utilização de um computador junto a placa.

Shield Micro SD: este dispositivo permite que os dados adquiridos pelo Arduino sejam armazenados em um cartão Micro SD, o que permite maior portabilidade sem a necessidade de transporte do computador. Assim, o processamento do sinal adquirido será feito após a aquisição do sinal.

Cabos: para a ligação dos componentes foi utilizado cabos de 1,4 mm de aplicação em microeletrônica, e para a utilizar a bateria utilizamos o adaptador Jumper JP4.

O Quadro 3 mostra os valores dos equipamentos comprados na loja física Comercial Eletrônica System Ltda localizada em Porto Alegre, RS e do *smartphone* utilizado que foi adquirido em 2018. A placa Arduino Uno utilizada foi levado em conta o valor do dia 18/11, devido ao mesmo ter sido adquirido há algum tempo.

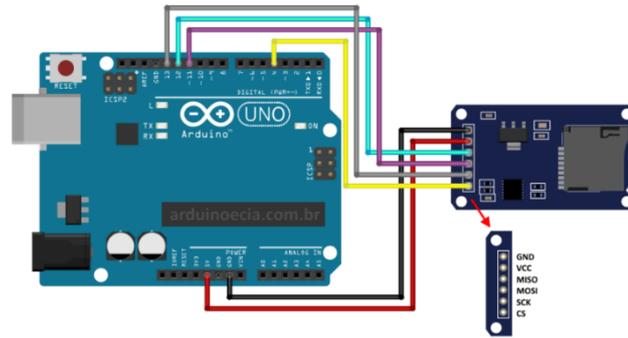
Os itens que constituem o sistema para aquisição de dados do Arduino foram montados conforme Figuras 24, 25 e a Fig. 26 apresenta o conjunto todo montado.

Quadro 3 - Orçamento dos equipamentos adquiridos

Componente	Preço	Vendedor	Data de acesso	Frete	Quantidade	Custo Total
Placa Uno SMD R3 Atmega328	R\$ 99,99	Casa da Robótica	18/11/2022	R\$ 23,10	1	R\$ 123,09
Bateria 9V	R\$ 19,00	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	1	R\$ 19,00
Módulo Leitor de Cartão Micro SD Card	R\$ 14,95	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	1	R\$ 14,95
Clips de Bateria 9V Conector Bateria 90gr	R\$ 2,50	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	2	R\$ 5,00
Plug P4 Importado 2,1mmx5,5x14 mm com Rabicho corpo Plástico	R\$ 2,50	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	2	R\$ 5,00
MODULO WIFI + BLUETOOTH ESP32S NODEMCU - VERSAO "S " - 38 PINOS	R\$ 89,00	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	1	R\$ 89,00
Acelerômetro e Giroscópio MPU-6050 3 Eixos 6 DOF - GY521	R\$ 29,00	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	2	R\$ 58,00
Cabo Flexível 1x0,14mm Cabinho - 26 AWG	R\$ 1,50	Comercial Eletrônica System Ltda	03/10/2022	R\$ 0,00	20	R\$ 30,00
Smartphone Galaxy A8 (2018)	R\$ 1500,00	Samsung	01/12/2018	R\$ 0,00	1	R\$ 1500,00
Total						R\$ 1844,04

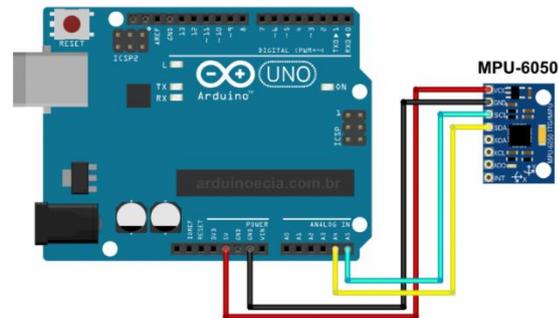
Fonte: (AUTOR, 2022)

Figura 24 - Circuito de ligação Arduino e shield micro SD



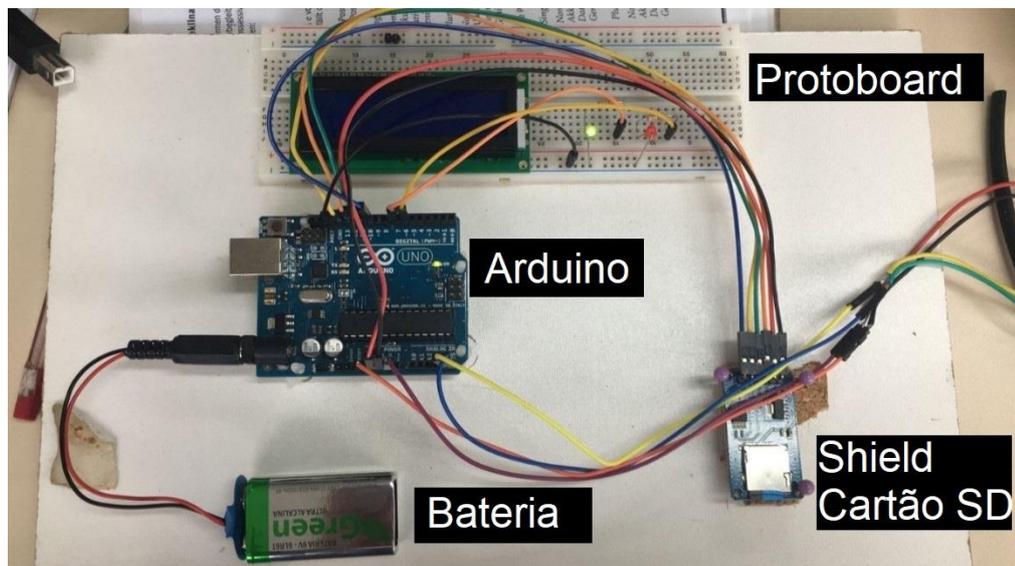
Fonte: (ARDUINO E CIA, 2022)

Figura 25 - Circuito de ligação Arduino e MPU 6050



Fonte: (ARDUINO E CIA, 2022)

Figura 26 - Componentes do Arduino montado

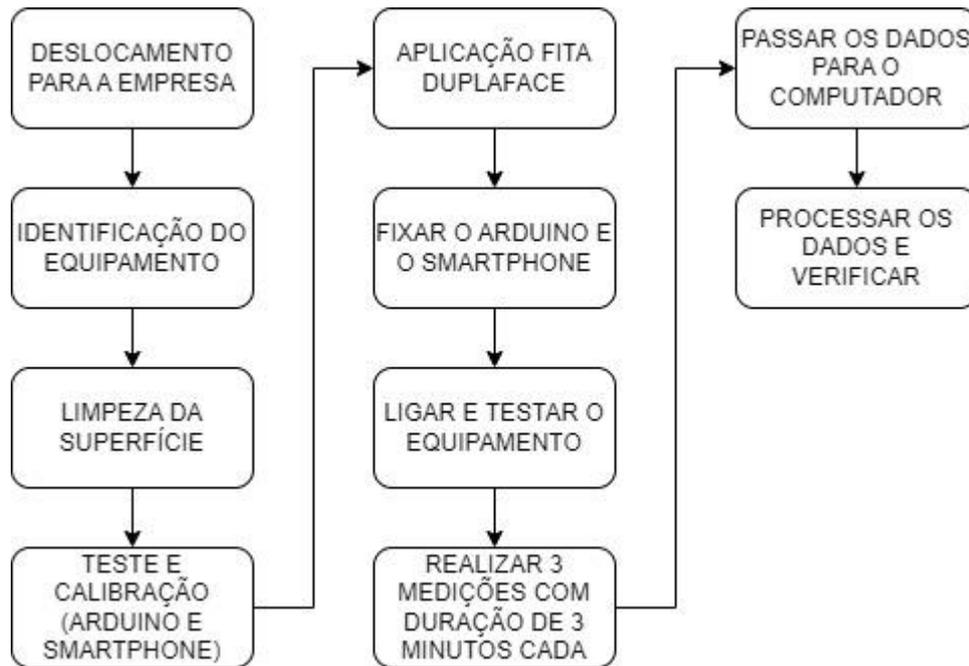


(AUTOR,2022)

4.4.2 Aquisição dos dados

O procedimento adotado para realização da aquisição dos sinais é apresentado no fluxograma da Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma do procedimento



4.4.3 Montagem para aquisição dos sinais

Na empresa com o auxílio do responsável pela manutenção, foi identificado o local dos respectivos motoredutores. Então foi feita uma limpeza com pano na superfície do equipamento onde são fixados o Arduino e o *smartphone*, assim, com a superfície limpa foi fixado os componentes de aquisição com fita dupla face. Primeiro foi feito a aquisição do sinal no motoredutor R77 e depois no R67. Nas Figuras 28 e 29 é possível ver a fixação do Arduino e do *smartphone* no R77 e no R67 respectivamente bem como o arranjo junto ao computador.

Figura 28 - Posicionamento do Arduino e do *smartphone* no redutor R77

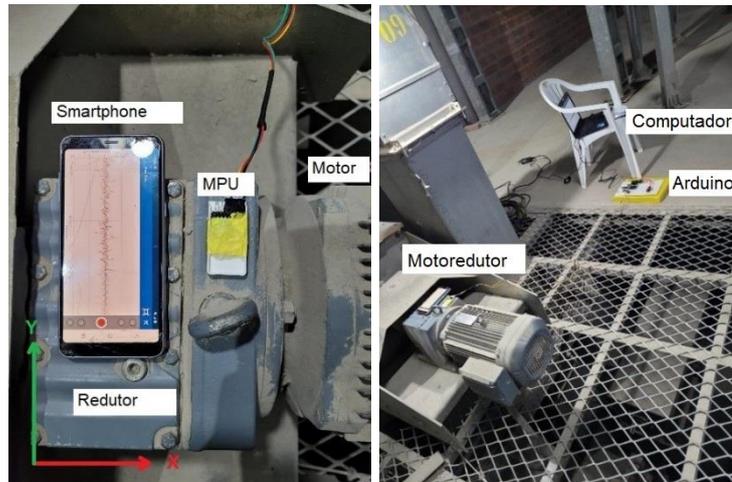


Figura 29 - Posicionamento do Arduino e do *smartphone* no redutor R67



4.4.4 Processamento do sinal

Por fim, é feito o processamento e análise dos sinais, com isso é feito a leitura do arquivo de texto gerado pelo Arduino e pelo *smartphone* utilizando o aplicativo *Octave*. Após feita a leitura é possível executar o gráfico do sinal dos eixos x , y e z no tempo, com isso é possível verificar se houve algum erro na gravação do sinal.

Com os dados verificados é aplicado a função FFT e a função PSD no sinal, e então os dados estão prontos para serem postos no gráfico. Além disso é possível ainda calcular as médias dos sinais e o valor *RMS* de cada coordenada separada.

O sinal tanto do Arduino quanto do *smartphone* é gravado nos 3 eixos cartesianos e para uma melhor análise dos dados é feito o cálculo do módulo do sinal, obtendo assim o valor em módulo, o que facilita a análise, pois é possível a visualização de todas as frequências em um único gráfico. Além disso para melhor distribuir os dados da frequência e conseguir que a amplitude base seja zero é diminuído a média dos dados antes de ser aplicado a FFT.

5 RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados os resultados, que consistem primeiramente no cálculo das frequências a serem encontradas e como foram dispostos o Arduino e *smartphone* no equipamento da empresa para obtenção dos espectros. Em seguida com os dados, é feita a comparação dos sinais dos dois dispositivos de aquisição, considerando como frequência máxima 100 Hz. Por fim, são apresentados os dados dos dois motoredutores e é feita uma comparação para encontrar características distintas entre eles sabendo que o motoredutor R77 apresentava certo ruído.

5.1 FAIXAS DE FREQUÊNCIA PRELIMINARES

No dia da visita à empresa, optou-se por fazer a análise em dois redutores de mesmo funcionamento, entretanto de potências diferentes devido à dificuldade de acesso. Os motoredutores analisados então são o R67 e o R77. Os dados dos redutores são ilustrados nos Quadros 4 e 5 (R67), nos Quadros 7 e 8 (R77).

Os redutores estavam em pleno funcionamento, sendo o motoredutor R77 (Fig. 28) responsável por atuar sobre uma rosca transportadora localizada em baixo do secador de arroz e o R67 responsável por uma rosca transportadora que pegava o arroz da saída de um silo de arroz seco (Fig. 29).

Quadro 4 - Especificações do motor R67

	Marca	SEW
	Tipo	Indução
	Nº Fase	Trifásico
	Potência Nominal	7,4 CV
	Frequência	60 Hz
	Rotação Nominal	1764 rpm
	Voltagem	220/380/440/ (760)
	Rendimento	91,0 %

Quadro 5 - Especificações do redutor R67

	Fabricante	SEW
	Modelo	R67
	Redução Efetiva	1:12,70
	Potência Entrada	7,4 CV

Os Quadros 6 e 9 a seguir, são importantes para uma visualização das frequências principais do sistema, isso permite a identificação de forma mais fácil das frequências que irão aparecer nos espectros.

No Quadro 10 estão agrupadas as frequências que deverão ser observadas nos espectros, estas estão definidas na Seção 4.3.

Quadro 6 - Dados das engrenagens do redutor R67

Descrição	Primeiro estágio		Segundo Estágio	
	Pinhão (Z1)	Engrenagem (Z2)	Pinhão (Z3)	Engrenagem (Z4)
Número de dentes, Z	23	47	14	87
Rotação do Eixo (Hz)	29,4		2,32	
Rotação do conjunto (Hz)	676,2		201,42	
Razão de Redução Geral (Hz)	$(Z2/Z1) * (Z4/Z3) = 12,70$			

Quadro 7 - Especificações do motor R77

	Marca	SEW
	Tipo	Indução
	N° Fase	Trifásico
	Potência Nominal	10 CV
	Frequência	60 Hz
	Rotação Nominal	1757 rpm
	Voltagem	220/380/440/ (760)

Quadro 8 - Especificações do redutor R77

	Fabricante	SEW
	Modelo	R77
	Redução Efetiva	1:12,33
	Potência Entrada	10 CV

Quadro 9 - Dados das engrenagens do redutor R77

Descrição	Primeiro estágio		Segundo Estágio	
	Pinhão (Z1)	Engrenagem (Z2)	Pinhão (Z3)	Engrenagem (Z4)
Número de dentes, Z	23	49	14	81
Rotação do Eixo (Hz)	29,28		2,38	
Rotação do conjunto (Hz)	673,44		192,41	
Razão de Redução Geral (Hz)	$(Z2/Z1) * (Z4/Z3) = 12,33$			

Figura 30 - Redutor R77 acoplado a saída do secador de arroz

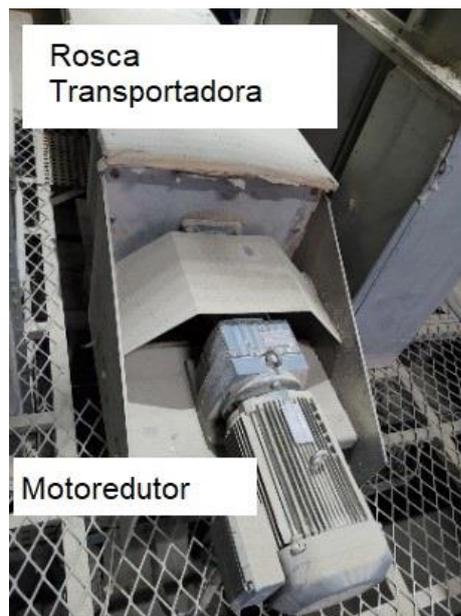


Figura 31 - R67 acoplado a rosca de saída do silo de arroz seco



Quadro 10 - Frequências esperadas nos motorredutores R67 e R77

	Frequência (Hz) do motorreductor R67	Frequência (Hz) do motorreductor R77
f_{r1}	29,4	29,28
f_{r2}	14,49	13,74
f_{r3}	2,315	2,38
f_{m11}	676,2	673,44
f_{m21}	201,42	192,41
$f_{m11} - f_{r1}$	646,8	644,16
$f_{m11} - 2f_{r1}$	617,4	618,88
$f_{m11} + f_{r1}$	705,6	702,72
$f_{m11} + 2f_{r1}$	735	732
$f_{m21} - f_{r1}$	172,02	163,13
$f_{m21} - 2f_{r1}$	142,62	133,85
$f_{m21} + f_{r1}$	230,82	221,69
$f_{m21} + 2f_{r1}$	260,22	250,97
Harmônico 1	29,4	29,28
Harmônico 2	58,8	58,56
Harmônico 3	88,2	87,84
Harmônico 4	117,6	117,12

5.2 ESPECTROS DE VIBRAÇÃO

Nesta seção são apresentados os sinais adquiridos dos motoredutores R67 e R77, e então é feita primeiramente a comparação entre os dados do Arduino e o *smartphone* e por fim após a avaliação do melhor dispositivo e feito a comparação entre os sinais do motoredutor R67 e R77 a fim de observar as principais diferenças entre estes.

5.2.1 Comparação dados do Arduino com o *smartphone*

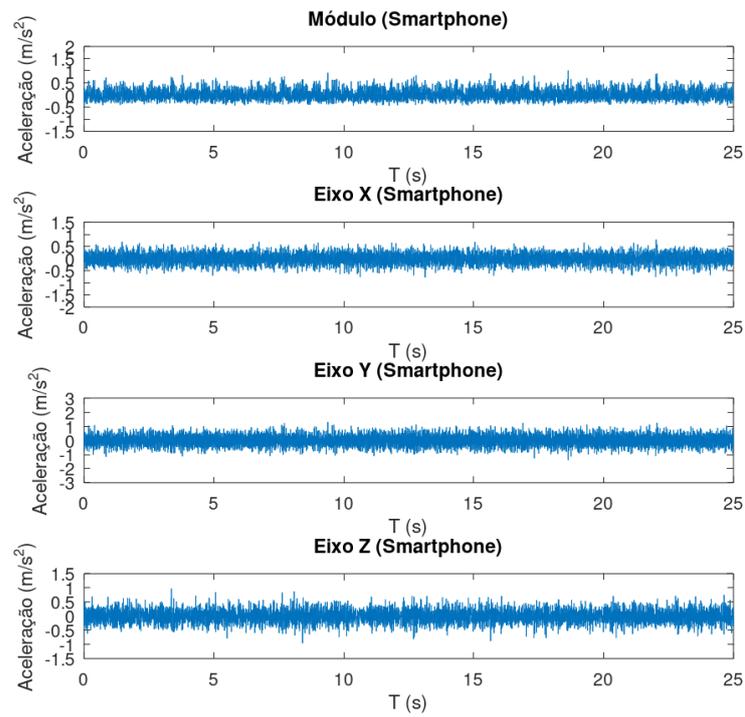
Para efeito de comparação foi utilizado apenas o sinal do modelo R67. Com isso, a Figura 32 apresenta o sinal no tempo de todos os eixos (X , Y e Z) e também do módulo do sinal tanto para o *smartphone* (Fig. 32 (a)) quanto para o Arduino (Fig. 32 (b)).

Na Figura 32 tem-se que a maior diferença percebida nos sinais é na amplitude, percebe-se que o Arduino apresenta maior amplitude do que o sinal obtido pelo *smartphone*.

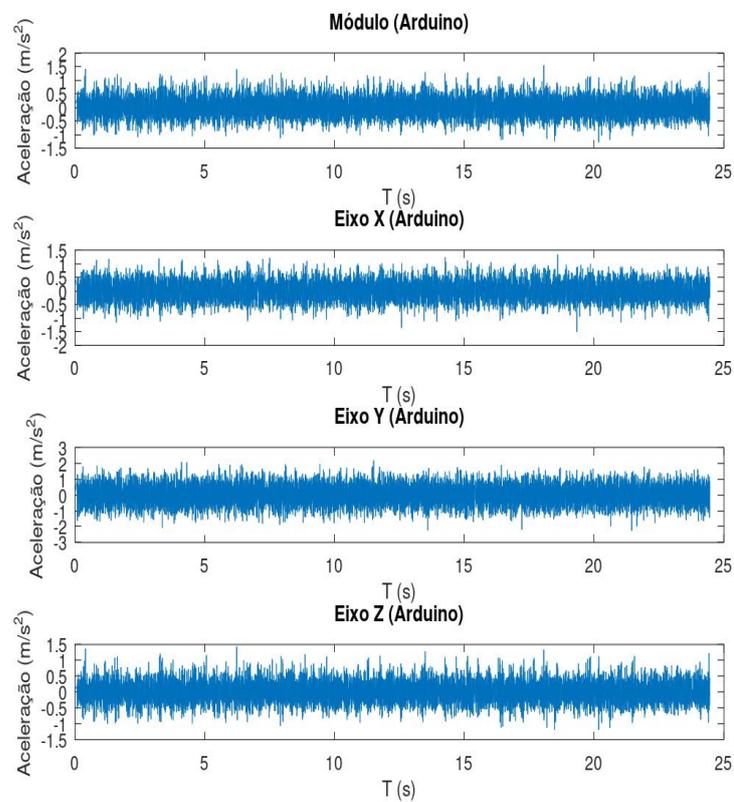
Em seguida são apresentados os gráficos referentes a frequência (eixo x) e a aplicação da função PSD que possibilita uma melhor leitura das frequências. O sinal do eixo x foi escolhido, pois aplicando-se a FFT foi o sinal mais coerente para o *smartphone*. Para parâmetro de comparação a frequência máxima do Arduino é limitada em 100 Hz que é a frequência de aquisição máxima do *smartphone* utilizado.

Com os gráficos apresentados nas figuras 33 e 34 (Arduino em laranja e *smartphone* em azul) são identificadas algumas frequências com maior amplitude, e a que mais se destaca é a frequência de 29,4 Hz que é a frequência de rotação do motor. Nos dados do *smartphone* (Fig 33) ainda é possível observar um pequeno pico em 62 Hz e em 82,5. Por fim no gráfico do Arduino na Figura 33 referentes ao motoredutor R67 observamos pequenos picos em 37 Hz, 72,5 Hz, 86,7 e 95,6 Hz.

Em seguida é possível, tendo como base o Quadro 12, observar que o Arduino, por ter uma frequência máxima de 210 Hz superior aos 100 Hz, possibilita a visualização de um maior número de faixas de frequências, com isso, na seção seguinte é escolhido o Arduino para executar a comparação dos sinais dos motoredutores distintos.

Figura 32 – Sinal no tempo do motoredutor R67 (a) Arduino (b) *Smartphone*

(a)



(b)

Figura 33 - FFT dos dados obtidos do motoredutor R67

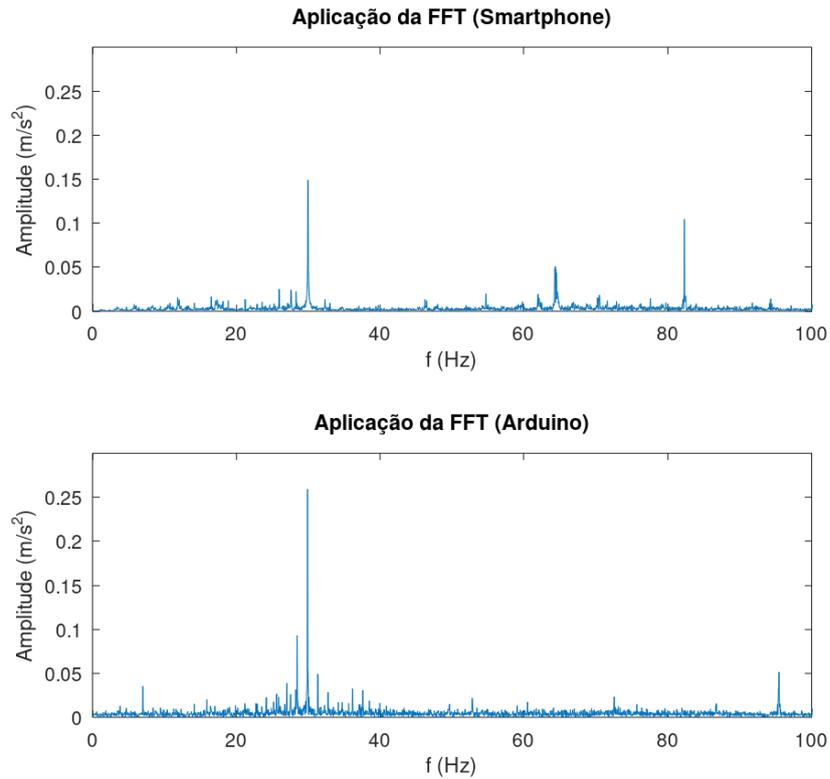
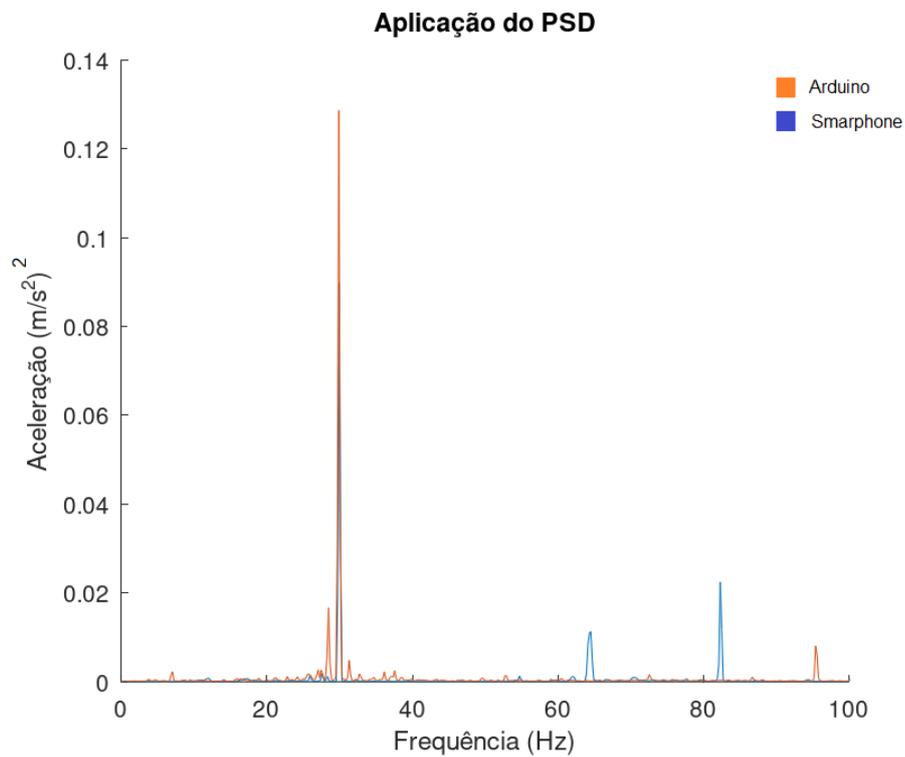


Figura 34 – Filtro PSD aplicado nos dados obtidos do motoredutor R67



5.2.2 Comparação R67 e R77

Nesta seção será executado uma comparação entre os espectros do motoredutor R67 e R77, comparando respectivamente o sinal no tempo, a aplicação da FFT e pelo o gráfico com a aplicação do PSD.

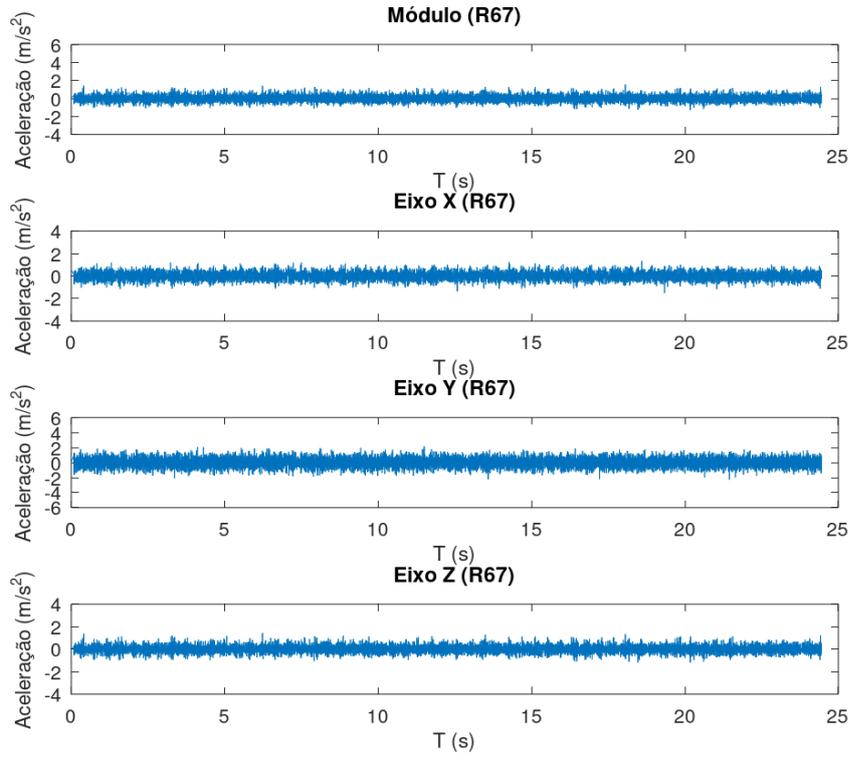
Com os dados apresentados anteriormente com frequência máxima de 100 Hz, para melhor comparação, abaixo os espectros de frequências dos sinais serão apresentados sem restrição. O Arduino apresentou uma frequência máxima próximo 210 Hz conforme observado nas Figuras 36 e 37.

É possível observar na Figura 35 que existe uma diferença aparente entre os gráficos do R77 (Fig. 35 (b)) e R67 (Fig. 35 (a)), a amplitude observada no modelo R77 é maior do que as apresentadas no outro modelo, o que já era esperado devido ser possível ouvir um ruído no motoredutor R77.

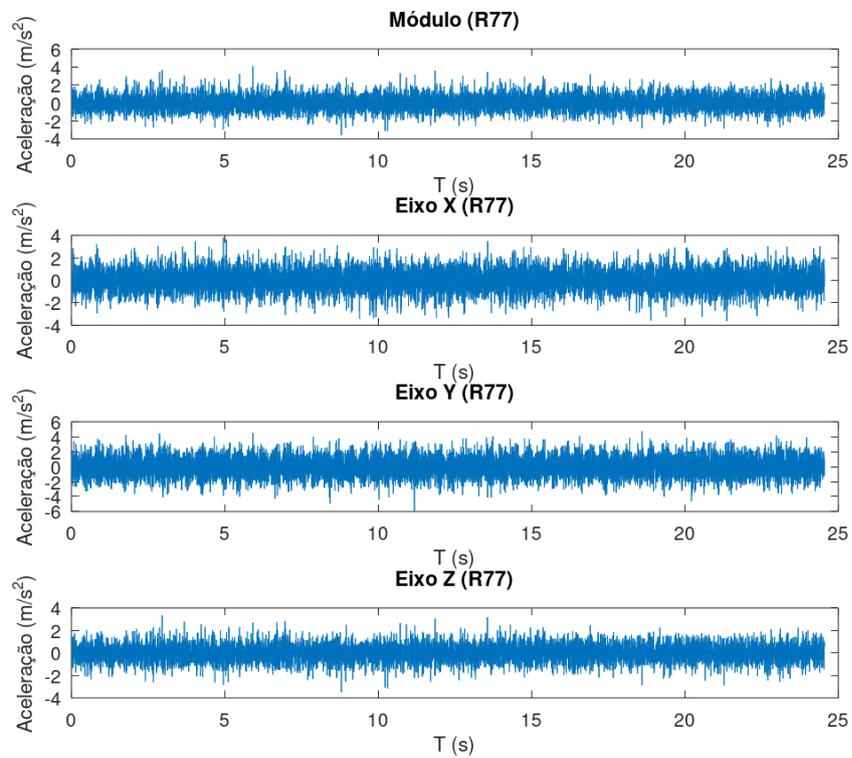
Na Figura 36 e 37 é possível observar que em ambos os espectros (R67 e R77) a frequência com maior destaque é próximo a 30 Hz, onde em ambos os redutores corresponde a frequência de rotação do motor. Outra observação clara é a densidade do sinal, o motoredutor R67 apresenta um sinal muito mais limpo com suas frequências bem definidas, entretanto quando olhamos o motoredutor R77 percebemos que (Figura 36) existe um sinal muito mais poluído e de difícil leitura das frequências ali dispostas. Esta característica se dá devido ao motoredutor apresentar certo ruído no seu funcionamento, que foi observado no dia da medição, já o motoredutor R67 demonstrou um comportamento mais natural sem ruídos aparentes.

As Figuras 36 e 37 foram utilizadas como base para a identificação das frequências esperadas definidas na Seção 5.1 e também apresentadas no Quadro 11 em sequência, vale ressaltar que algumas das frequências encontradas estavam próximas e nem sempre foi encontrado o valor exato esperado, pois em ambiente real há diversos fatores que podem influenciar sobre o funcionamento do equipamento. Contudo os espectros ilustrados nas figuras mencionadas não mostram com fidelidade a amplitude das vibrações, visto que nelas é possível ver que as frequências de maior amplitude se encontram no sinal do modelo R67. Já nos espectros do sinal no tempo mostra ao contrário, que os sinais do R77 têm maior amplitude, por isso, optou-se por realizar a conferência das amplitudes para os eixos separados.

Figura 35 - Sinal no tempo dos Redutores utilizando Arduino (a) R67 e (b) R77



(a)



(b)

Figura 36 - Espectros de Frequência R67 e R77 (Arduino)

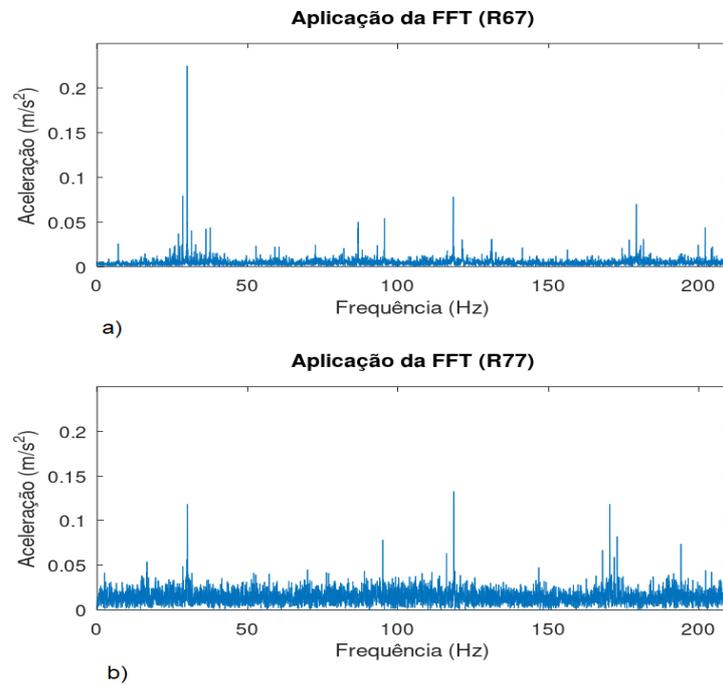
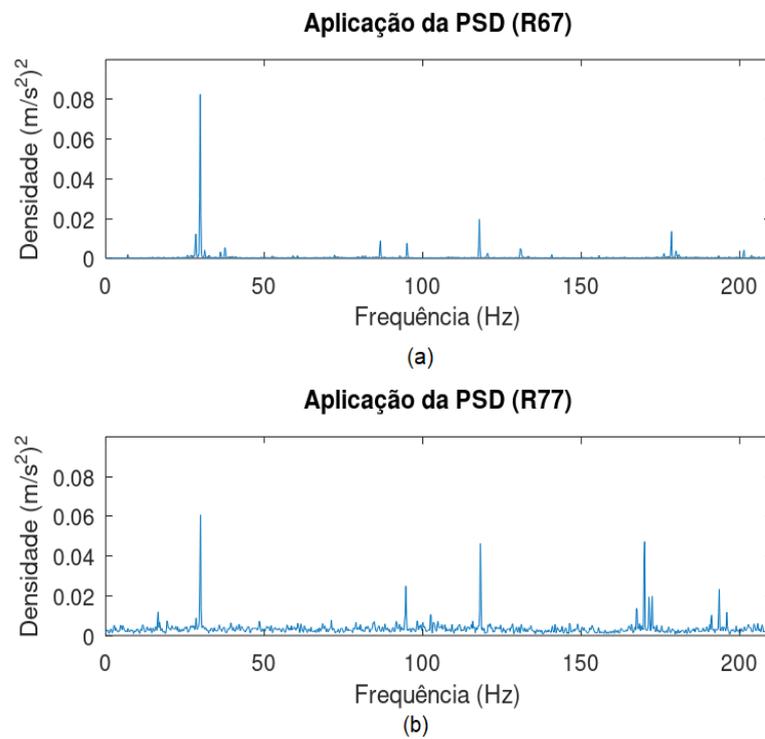


Figura 37 - Espectros de Frequência com filtro PSD: (a) R67 e (b) R77 (Arduino)



A seguir são apresentadas no Quadro 11, todas as frequências encontradas nos sinais coletados pelo Arduino comparadas com as faixas de frequência esperadas.

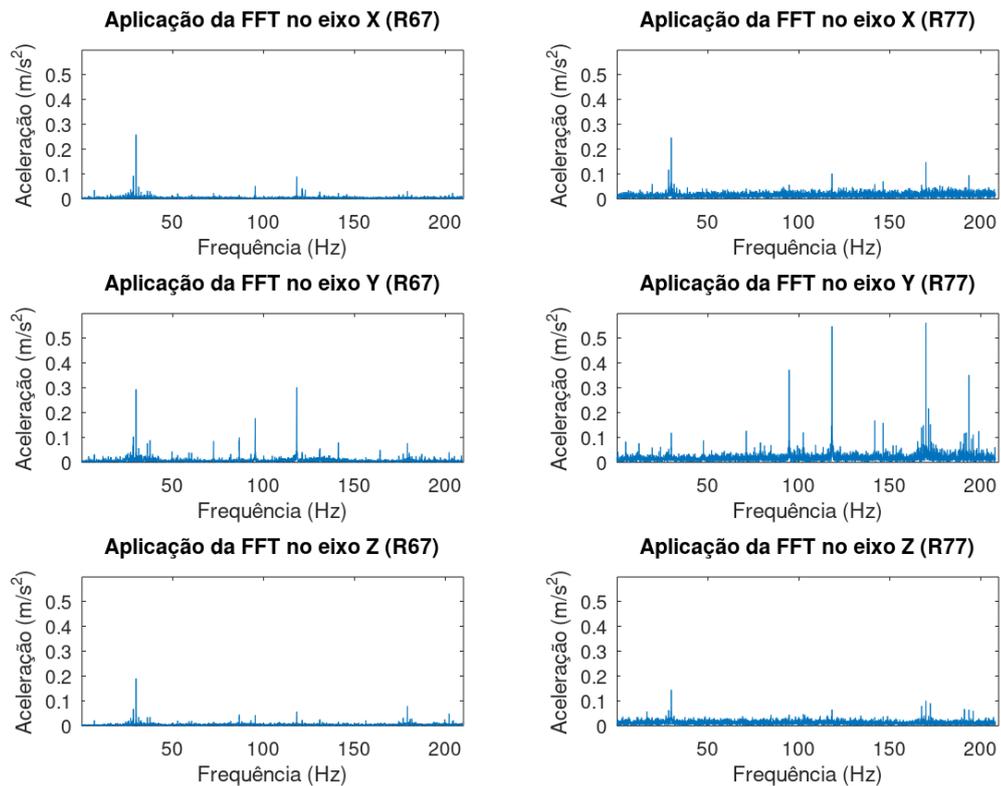
Quadro 11 – Frequências esperadas que foram encontradas

Características	Frequência (Hz) esperadas do motorreductor R67	Encontrada (Sim/Não)	Frequência (Hz) esperadas do motorreductor R77	Encontrada (Sim/Não)
f_{r1}	29,4	Sim	29,28	Sim
f_{r2}	14,49	Não	13,74	Sim
f_{r3}	2,315	Não	2,38	Sim
f_{m11}	676,2	Não	673,44	Não
f_{m21}	201,42	Sim	192,41	Sim
$f_{m11} - f_{r1}$	646,8	Não	644,16	Não
$f_{m11} - 2f_{r1}$	617,4	Não	618,88	Não
$f_{m11} + f_{r1}$	705,6	Não	702,72	Não
$f_{m11} + 2f_{r1}$	735	Não	732	Não
$f_{m21} - f_{r1}$	172,02	Sim	163,13	Sim
$f_{m21} - 2f_{r1}$	142,62	Sim	133,85	Sim
$f_{m21} + f_{r1}$	230,82	Não	221,69	Não
$f_{m21} + 2f_{r1}$	260,22	Não	250,97	Não
Harmônico 1	29,4	Sim	29,28	Sim
Harmônico 2	58,8	Sim	58,56	Sim
Harmônico 3	88,2	Sim	87,84	Sim
Harmônico 4	117,6	Sim	117,12	Sim

Com base neste quadro, é possível observar que as frequências f_{r2} e f_{r3} não foram possíveis de ser observadas no sinal do motorreductor R67, porém no R77 estas foram observadas. Diversas frequências como as frequências das malhas de engrenagens que são superiores a frequência de 210 Hz não são possíveis de serem observadas, devido às limitações do sistema de coleta de dados.

A Figura 38 traz um panorama geral das amplitudes dos eixos de forma separada. Essas, então nos permite observar que apenas no eixo Y há uma discrepância significativa entre as amplitudes, com isso será utilizado os dados referentes ao eixo Y para a execução da análise pelo nomograma.

Figura 38 - FFT dos eixos separadas



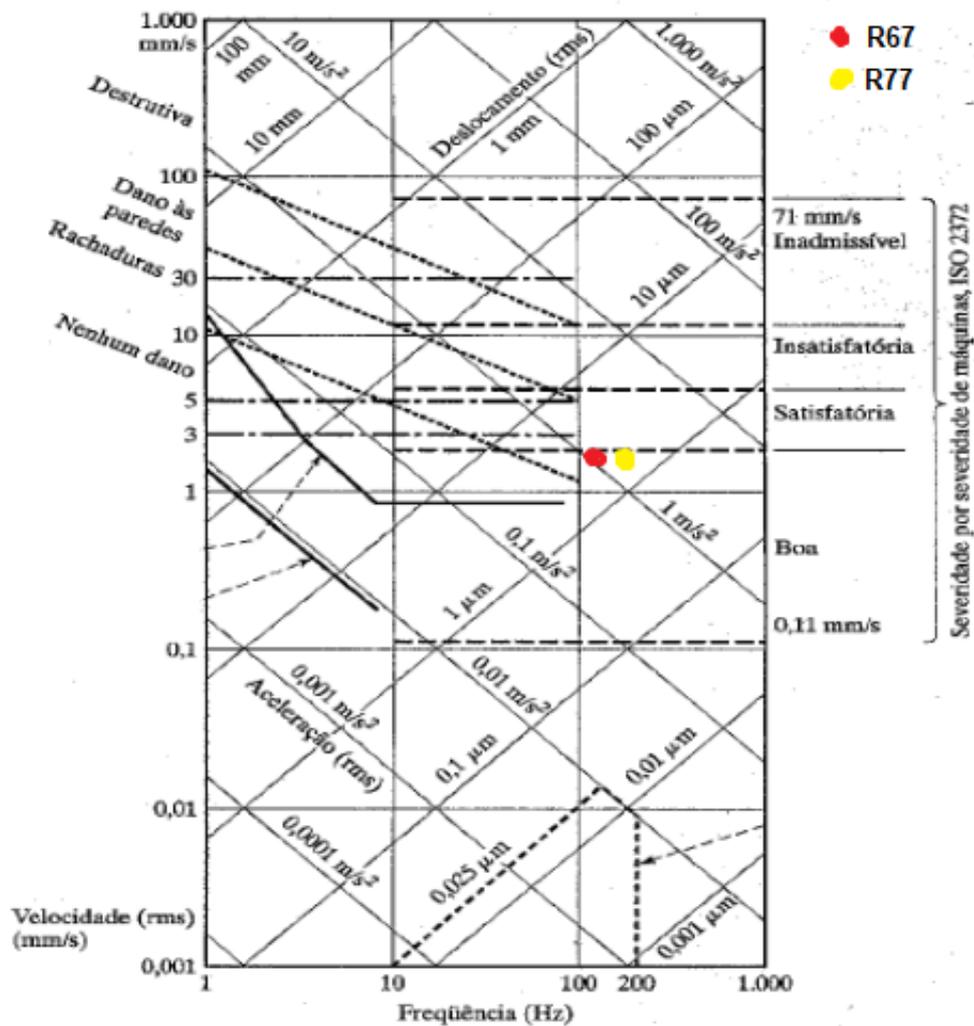
A partir dos dados coletados no domínio do tempo, são calculadas as médias RMS das acelerações. Utilizando o modulo como sinal de comparação não é possível observar uma diferença grande nos sinais *RMS*, tendo para o R77 o valor de 10,556 e para o R67 o valor de 10,592. Contudo quando olhamos os sinais segregando por seus eixos temos os valores dispostos no Quadro 12 a seguir:

Quadro 12 - Valores do RMS de acordo com o eixo

Eixo	R67 (m/s ²)	R77 (m/s ²)
X	1,0665	1,3706
Y	1,0489	1,8825
Z	10,486	10,293

Por fim, como a maior discrepância dos valores RMS foi encontrada no valor referente ao eixo Y, este será representado no nomograma apresentado na Figura 39. E ainda para a utilização do nomograma é preciso observar que a maior amplitude ocorre na frequência de 118,36 Hz para o R67 e de 170 Hz para o R77.

Figura 39 - Nomograma dos valores observados no eixo Y



Utilizando o nomograma é possível observar que mesmo que o Redutor R77 apresentava ruídos no momento da obtenção dos dados, não é possível observar uma alteração nos níveis de vibração utilizando o Nomograma.

6 CONCLUSÃO

Com base nas análises dos dados experimentais obtidos, podem-se estabelecer conclusões quanto ao melhor dispositivo para aquisição dos dados, bem como a identificação de características que diferem o sinal dos dois modelos do motoredutor.

A utilização do *smartphone* para aquisição dos espectros de vibração não mostrou vantagem em relação ao uso do Arduino, pois o mesmo limitou o sinal em 100 Hz, além de mostrar um sinal com mais ruídos na medição do sinal do redutor que apresentava ruído (R77). O valor do *smartphone*, mesmo não sendo um modelo de última geração, é bem superior ao valor gasto para montar o sistema com o Arduino.

Com isso, sobre o uso do Arduino ou do *smartphone*, é válido concluir que o *smartphone* tem as piores características para esta aplicação, e por isso o Arduino se mostra vantajoso sobre o *smartphone*, mesmo sendo um sistema que não é tão comum de possuir quanto o *smartphone*.

Sobre a comparação entre os sinais do motoredutor R67 e R77, é possível concluir apenas que o sinal do redutor R77 é mais denso e poluído do que o sinal do redutor R67, não foi possível identificar outras características como pico de amplitude por exemplo, pois em módulo o sinal do modelo R67 ainda demonstra menor amplitude. O valor RMS do sinal também mostra menor valor para o modelo R77 e com isso não fica clara alguma característica fora a densidade de ruídos para diferenciar os dois espectros.

Por se tratar de equipamentos de grande porte e com faixas de vibração em frequências que passam dos 300 Hz, ambos os equipamentos não seriam suficientes para captar informações referentes as faixas de vibração em altas frequências.

Para uma análise mais eficaz e que fosse possível analisar todas a vibração mesmo em altas frequências, seria necessário um novo acelerômetro ou um algoritmo que permitisse adquirir os sinais pelo Arduino em altas frequências, pois o acelerômetro utilizado permite taxa de aquisição de até 1000 Hz. Contudo, para verificação se os dados em alta frequência são fiéis é necessária uma calibração utilizando um dispositivo profissional para verificação do erro.

Por fim, estes dois dispositivos nos permitem fazer uma análise bem rasa sobre o conjunto de engrenagens, pois estes possuem altas frequências em alguns estados, contudo como mostrado no trabalho é possível perceber uma diferença entre os sinais de um redutor apresentando ruídos e um redutor em bom estado. Isso permitiria identificar outros equipamentos que possuem alguma irregularidade similar ao analisado.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Considera-se então alguns pontos para trabalhos futuros, que possam fornecer resultados mais assertivos: utilizar equipamento de uso industrial para comparação com o Arduino, validando ou não o equipamento; execução de comparação de espectros de vibração adquiridos de um equipamento com o mesmo modelo e que esteja em bancada para ser possível uma análise de operação igual; realizar uma nova comparação entre os modelos atuais (2023) de *smartphone* e o Arduino; realizar uma melhor fixação do *smartphone* evitando que o mesmo se mova durante o processo de medição; experimentar algoritmos que permitam utilizar a taxa de aquisição do MPU para 1000 Hz e comparar com um equipamento de uso industrial para verificar sua usabilidade.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. T. de. **Vibrações mecânicas para engenheiros**. E. Blucher, São Paulo, 1990.
- ARATO JR., A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004. 190 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- BRENDOW, L. et al. **Estudo comparativo da análise de performance de turbinas eólicas no domínio de frequência**, 2018 Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4288/2/BrendowLOS_ART.pdf>
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: 3º levantamento da safra 2019/20**. Brasília, 2020b.
- DANIELA_NEU. **Empresa do Arroz Rei Arthur completa 60 anos de história**. Disponível em: <<https://www.gaz.com.br/empresa-do-arroz-rei-arthur-completa-60-anos/>>. Acesso em: 17 mar. 2023.
- ERRICHELLO, Robert; MULLER, Jane. **How to analyze gear failures**. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2002, 2.6: 8-16.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Arroz irrigado**. Brasília: Embrapa, 2019.
- FENG, Maria *et al.*, **Citizen Sensors for SHM: Use of Accelerometer Data from Smartphones**, 2015.
- FERNANDES, A. B.; REIS, J. L.; ROLIM, J. G. **Coordenação de Isolamento de Transformadores Utilizando um Modelo em Frequência e a Densidade Espectral de Energia**, 2019.
- FILHO, Marco S. **Engrenagens - Geometria e Projeto, 2ª edição**. Grupo GEN, 2017.
- GREEN, A. **The study of the failure modes of a spur gear using vibration an particle analysis techniques**. Melbournel: James Cook University, School of Engineering, 2003.
- HERPICH, C.; FOGLIATTO, F. S. **Aplicação de FMECA para Definição de Estratégias de Manutenção em Um Sistema de Controle e Instrumentação de Turbogeneradores**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, 30 jun. 2013.
- HJORT, A. et al., 2015, **Measuring mechanical vibrations using an Arduino as a slave I/O to an EPICS control system**.
- INMAN, Daniel. **Vibrações Mecânicas**.: Grupo GEN, 2018.

INMAN, D. J., **Engineering Vibration**, 3th ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2001.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção-função estratégica**. Qualitymark Editora Ltda, 2009.

LAGO, Daniel F., **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**, PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: UNESP, 2007.

MACEDO, M. A., **Contribuição metodológica para a determinação da Criticidade de equipamentos na gestão da manutenção**. Dissertação para obtenção de título em Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. 2011.

MARTINS, Ana Patrícia Riberio de Almeida Pires. **A Influência da Manutenção Industrial no Índice Global de Eficiência (OEE)**. Dissertação (Mestrado de Engenharia e Gestão Industrial) — Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2012.

MOBLEY, R. **Vibration fundamentals**. Elsevier Science, 1999.

MONCHY, F. **A função da manutenção**. São Paulo: DURBAN, 1989.

ORHAN, Sadettin; AKTÜRK, Nizami; CELIK, Veli. **Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies**. *Ndt & E International*, 2006, 39.4: 293-298.

PINTO, Ricardo S. A.. **Indicadores de desempenho de frota de empresas agroindustriais canavieiras brasileiras**. 2002. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.

RAO, Singiresu S. **Vibrações mecânicas**. Pearson Educación, 2009.

SCHEFFER, C., & GIRDHAR, P. (2004). **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Newnes.

VARANIS, M., SILVA, A. L., BRUNETTO, P. H. A., & GREGOLIN, R. F. (2016). **Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(1).

VERRI, Luiz Alberto. **Gerenciamento pela Qualidade Total na Manutenção Industrial Aplicação e Prática**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2012.

ANEXO A – CÓDIGO PRINCIPAL DO OCTAVE

```

pkg load signal

# Ler dados
# Dados Arduino

dados1 = csvread('DT107_01.csv');
fator=16384/9.82;

ay1=dados1(1:10240,1)/fator;
ax1=-1*(dados1(1:10240,2)/fator);
az1=dados1(1:10240,3)/fator;
##t1=dados1(1:10240,4)/1000;

#padronizar os tempos para plotagem no
grafico do Deslomento pelo tempo

t11=dados1(1:10240,4)/1000;
TA=9280/1000;
##TA = 35765/1000;
##TA = 8689/1000,
t1 =t11-TA;
####

# Dados Arduino 2

##dados = csvread('DT107_02.csv');
##fator=16384/9.82;
##
##ay=dados(1:10240,1)/fator;
##ax=-1*(dados(1:10240,2)/fator);
##az=dados(1:10240,3)/fator;
##t=dados(1:10240,4)/1000;
##t12=dados(1:10240,4)/1000;
##TA=8689/1000;
##TA = 9280/1000;
##t =t12-TA

# Dados Smartphone

dados = csvread('bat2.csv');
t=dados(1:5059,1);
ax=dados(1:5059,2);
ay=dados(1:5059,3);
az=dados(1:5059,4);

# Modulo dos sinais

M=ax.^2+ay.^2+az.^2;
modulo=sqrt(M);
M1=(ax1.^2)+(ay1.^2)+(az1.^2);
modulo1 = sqrt(M1);

# Calculos

# Médias

mean_M=mean(modulo)
mean_ax=mean(ax)
mean_ay=mean(ay)
mean_az=mean(az)
mean_time=mean(t)

mean_M1=mean(modulo1)

mean_ax1=mean(ax1)
mean_ay1=mean(ay1)
mean_az1=mean(az1)
mean_time1=mean(t1)

#Valor Rms
rms_ax=rms(ax)
rms_ay=rms(ay)
rms_az=rms(az)
rms_modulo=rms(modulo)

rms_ax77=rms(ax1)
rms_ay77=rms(ay1)
rms_az77=rms(az1)
rms_modulo77=rms(modulo1)

#Variância
var_ax=var(ax)
var_ay=var(ay)
var_az=var(az)

#Desvio padrão
std_ax=std(ax)
std_ay=std(ay)
std_az=std(az)

#correção
ax=ax-mean_ax;
ay=ay-mean_ay;
az=az-mean_az;
modulo=modulo-mean_M;

ax1=ax1-mean_ax1;
ay1=ay1-mean_ay1;
az1=az1-mean_az1;
modulo1=modulo1-mean_M1;

fmax=100;

[f1, af1] = comp_fft_complex_co(t,ax);
[f2,af2] = comp_psd(t,ax, 5);
[f3, af3] =
comp_fft_complex_co(t,modulo);
[f4,af4] = comp_psd(t,modulo, 5);
[f5, af5] = comp_fft_complex_co(t,az);
[f6,af6] = comp_psd(t,az, 5);

[f7, af7] =
comp_fft_complex_co(t1,ax1);
[f8,af8] = comp_psd(t1,ax1, 5);
[f9, af9] =
comp_fft_complex_co(t1,modulo1);
[f10,af10] = comp_psd(t1,modulo1, 5);
[f11, af11] =
comp_fft_complex_co(t1,az1);
[f12,af12] = comp_psd(t1,az1, 5);

#Plotagem LOG Y
##figure(2);clf
##subplot(1,2,1)
##semilogy(f2,af2)
##subplot(1,2,2)

```

```

##semilogy(f4,af4)

##Plotagem FFT

figure(2);clf
subplot(3,2,1)
plot(f1,af1);
hold on
ylim([0 0.6])
xlim([0.18 fmax])
title('Aplicação da FFT no eixo X
(R67)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(3,2,3)
plot(f3,af3);
hold on
ylim([0 0.6])
xlim([0.18 fmax])
title('Aplicação da FFT no eixo Y
(R67)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(3,2,5)
plot(f5,af5);
hold on
ylim([0 0.6])
xlim([0.18 fmax])
title('Aplicação da FFT no eixo Z
(R67)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(3,2,2)
plot(f7,af7);
hold on
ylim([0 0.6])
xlim([0.18 fmax])
title('Aplicação da FFT no eixo X
(R77)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(3,2,4)
plot(f9,af9);
hold on
ylim([0 0.6])
xlim([0.18 fmax])
title('Aplicação da FFT no eixo Y
(R77)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(3,2,6)
plot(f11,af11);
hold on
ylim([0 0.6])
xlim([0.18 fmax])
title('Aplicação da FFT no eixo Z
(R77)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

##Plotagem Deslocamento

figure(1);clf
subplot(4,1,1)
plot(t,modulo);
hold on
xlim([0 25])
ylim([-1.5 2])
title('Módulo (Smartphone)')
xlabel('T (s)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(4,1,2)
plot(t,ax);
hold on
xlim([0 25])
ylim([-2 1.5])
title('Eixo X (Smartphone)')
xlabel('T (s)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(4,1,3)
plot(t,ay);
hold on
xlim([0 25])
ylim([-3 3])
title('Eixo Y (Smartphone)')
xlabel('T (s)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

subplot(4,1,4)
plot(t,az);
hold on
xlim([0 25])
ylim([-1.5 1.5])
title('Eixo Z (Smartphone)')
xlabel('T (s)')
ylabel('Aceleração (m/s^2)')

# PLOTagem PSD

figure(3);clf
##plot(f1,af1);
subplot(2,1,1)
plot(f10,af10);
hold on
##ylim([0 0.3]);
ylim([0 0.1]);
xlim([0 fmax]);
title('Aplicação da PSD (R67)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Densidade (m/s^2)^2')

##

subplot(2,1,2)
plot(f10,af10);
hold on
##ylim([0 0.3]);
xlim([0 fmax]);
ylim([0 0.1]);
title('Aplicação da PSD (R77)')
xlabel('Frequência (Hz)')
ylabel('Densidade (m/s^2)^2')

```

ANEXO B – CÓDIGO COMP_FFT_COMPLEX_CO

```

% calcula a FFT e retorna a resposta complexa (amplitude e fase)
function [f_fft,a_fft] = comp_fft_complex_co(t,x)

%---
disp('----- FFT -----')
%--- fft -
% exemplo dado em http://matlabgeeks.com/tips-tutorials/how-to-do-a-fourier-transform-in-matlab/
%
Delta_t = (t(end) - t(1));
delta_t = Delta_t / (length(t)-1)
fs = 1./delta_t;

DT = t(end)-t(1);
n_pontos = length(x);
FS = 1/(DT/n_pontos)

fprintf(' delta_t %8.4f\n',delta_t);
fprintf(' Delta t      : %8.5f \n',DT );
fprintf(' fs          %8.4f\n',fs);
fprintf(' FS          %8.4f\n',FS);
fprintf(' n_pontos %5d\n',n_pontos);

%
Y = fft(x) ; %Retain Magnitude
P2 = abs(Y/n_pontos);
a_fft = P2(1:n_pontos/2+1);
a_fft(2:end-1) = 2*a_fft(2:end-1);

##a_fft = a_fft(1:(n_pontos/2)) / (n_pontos) ; %Discard Half of Points
f_fft = fs*(0:(n_pontos/2))/n_pontos; %Prepare freq data for plot

%---
disp('----- FIM -----')

end

```

ANEXO C – CÓDIGO COMP_PSD

```

%-----|
% function [ff,aa] = comp_psd(t,x,tj)
% t = vetor tempo
% x = sinal a ser processado
% tj = tempo de janelamento
% overlap = percentual de overlap
%
%-----|
function [ff,aa] = comp_psd(t,x,tj)

disp('----- PSD -----')
%disp(' Power Spectral Density ')
%-----
ti = t(1);
tf = t(end);
[n]=length(x);

t = t-t(1);
DT = tf - ti;
dt = DT/n; % t(2) - t(1);
fs = 1./dt;
%-----
%fprintf('tamanho do sinal : %d \n' ,n);
%fprintf('tempo no inicio : %8.5f s\n', ti);
%fprintf('tempo no fim : %8.5f s\n', tf);
%fprintf('Delta t : %8.5f \n',DT );
%fprintf('delta t : %8.5f \n',dt );
%fprintf('frequencia de amostragem : %8.5f Hz\n', fs);

%-----
% corrige a media

mean_x = mean(x);
acc = x - mean_x;

ti = t(1);
tf = t(end);
%-----|
% tempo da janela
if tj>tf,
    tj =tf-.01;
end

[n]=length(acc);
%calcula o tamanho (em pontos) da janela.
nwt = find(t >=(ti+tj),1,'first' ) -1;
overlap = 0.7;

%numero de janelas:
nwo = floor((1.-overlap)*nwt);
nw = floor((n - nwt)/nwo) + 1;

%-----|
if (nw<=0)
    disp('Atencao: verificar variaveis')
    ff=zeros(n,1);
    aa=zeros(n,1);
    return
end

%-----|

```

```

% pause
df = 1./(tj);
%-----
disp(['tamanho da janela :' num2str(nwt) ' pontos']);
disp(['tempo de janela   :' num2str(tj)  ' s']);
disp(['df                :' num2str(df)  ' Hz']);
disp(['NUMERO DE JANELAS :' num2str(nw)  ]);

%-----
%disp('freq - PSD - power spectral density - Welch ; Freq. (Hz) x (m^2)/Hz' );

% http://www.oit.uci.edu/dcslib/matlab/matlab-v53/help/toolbox/signal/pwelch.html
% pwelch
% Power spectral density (PSD) using Welch's method
% [Pxx,f] = pwelch(x>window,noverlap,nfft,fs)
[Pxx,fwlch] = pwelch( acc, window(@hann,nwt), [],[],fs);

[nG nfwlch] = size(Pxx);
nfw = length(fwlch);
nfim = floor(nG/2);

ff = fwlch(1:end);
aa = Pxx(1:end,1);

disp('----- FIM-----');

```