

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO RUTEMBERG MADEIRA SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES NO MOTOR DO CARRO ARRANCADA
DA UEMA.**

São Luís

2016

PAULO RUTEMBERG MADEIRA SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES NO MOTOR DO CARRO ARRANCADA
DA UEMA.**

Monografia apresentada à coordenação do curso de Engenharia Mecânica da universidade Estadual do Maranhão- UEMA, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador: Flávio Nunes Pereira

São Luís

2016

Santos, Paulo Rutenberg Madeira.

Estudo e análise das vibrações no motor do carro arrancada da UEMA/ Paulo Rutenberg Madeira Santos. – São Luís, 2016.
60 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Me. Flávio Nunes Pereira.

1. Vibração. 2. Motor. 3. Sensores. I. Título.

CDU 629.3.015.5:621.43

PAULO RUTEMBERG MADEIRA SANTOS

**ESTUDO E ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES NO MOTOR DO CARRO ARRANCADA
DA UEMA.**

Monografia apresentada à coordenação do curso de Engenharia Mecânica da universidade Estadual do Maranhão- UEMA, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador: Flávio Nunes Pereira

Aprovada em: _____ / _____ / _____

BANCA EXAMINADORA:

Profº Ms. Flávio Nunes Pereira
(Orientador)

Profº. Marco Selner Mesquita Viana
(Membro da Banca Examinadora)

Profº. Kaio Henrique Ferreira Nogueira
(Membro da Banca Examinadora)

Dedicatória,

A Deus por ter concedido que tudo isso acontecesse na minha vida e a minha família pelo apoio, incentivo e compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder a minha e sua vontade, através de sua bondade infinita, o potencial de concretizar mais uma conquista em minha vida.

Aos meus amigos Higor Leandro, Luís Felipe, Elyéverton Moraes e Gilberto Ramos pela colaboração na realização deste trabalho.

Ao Professor Marco Selner por me orientar nesse último período com artigos em diversos congressos e com a iniciação científica na UEMA.

Ao Professor Flávio Nunes, pela calma e pelo tempo disponível para me orientar neste trabalho.

E por fim, a Equipe Arrancada da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), que contribuíram de modo significativo, durante toda essa jornada. À todos o meu muito obrigado.

Epigrafe,

“Que as vibrações positivas nos tragam a força que precisamos para correr atrás da realização de nossos sonhos.”

-Aline Diedrich

RESUMO

Nos últimos anos, as análises de vibrações estão sendo amplamente utilizadas para a diminuição ou neutralização das vibrações estruturais, com aplicações nas engenharias mecânica, civil, naval e aeroespacial. Nos automóveis, as maiores fontes de vibrações e ruídos são produzidas pelas forças devido à combustão e as forças mecânicas. Essas forças ocorrem numa ampla faixa de frequência e são transmitidas para a superfície externa do motor através de diversos caminhos, um deles é através do mecanismo pistão-biela- virabrequim-bloco do motor. Como resultado da atuação destas forças, as superfícies externas do motor ficam sujeitas a vibrações de diversas amplitudes. Para a análise da condição de funcionamento de qualquer equipamento, devem ser medidas e registradas vibrações em cada uma das extremidades ou apoios. Este artigo tem como objetivo estudar e analisar as vibrações obtidas em experimentos no carro "arrancada" da UEMA. Esperando-se com isso determinar e conhecer as principais fontes excitadoras de vibrações no motor do carro, para que possamos diminuir as vibrações de maiores amplitudes existentes.

Palavras-Chave: Vibrações. Motor. Sensores.

ABSTRACT

In recent years, the analyzes of the vibrations are being widely used to reduce structural vibrations or neutralization, with applications in mechanical engineering, civil, aerospace and shipbuilding. And in automobiles, the largest sources of vibration and noise are produced by forces due to combustion and mechanical forces. These forces occur in a wide frequency range and are passed to the external surface of the motor through multiple paths; one mechanism is through the piston - rod - crankshaft - the engine block. As a result of the action of these forces, the engine outer surfaces are subjected to vibrations of various amplitudes. For analyzing the operating status of any equipment, shall be measured and recorded vibrations at each of the ends or support, with the aid of sensors, and programming Arduino board. This article aims to study and analyze the vibrations obtained in experiments in the car "rush" of UEMA. Waiting with it determine and meet the main excitatory sources of vibration in a car engine so that we can reduce the vibrations of larger amplitudes.

Keywords: Vibrations. Engine. Sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Pistões e volante do motor acoplados ao virabrequim..... | 17 |
| Figura 2- Exemplo de uma vibração determinística | 21 |
| Figura 3 - Exemplo de uma vibração random..... | 21 |
| Figura 4 - Exemplos esquemáticos de sistemas com graus de liberdade..... | 22 |
| Figura 5 - Movimento horizontal do sistema massa-mola-amortecedor com 1GDL.. | 24 |
| Figura 6 - Diagrama de corpo livre referente ao sistema da fig. 5..... | 24 |
| Gráfico 7- Sistema sem ADV e com amortecimento nulo. | 27 |
| Gráfico 8- Sistema sem ADV com amortecimento viscoso. | 27 |
| Figura 9 - Sistema de apoio do motor. | 28 |
| Figura 10 - Coxim original utilizado para a análise de vibração. | 30 |
| Figura 11 - Posições padrões para medição da vibração. | 34 |
| Figura 12-Funcionamento de um sensor de vibração. | 35 |
| Figura 13 - Alguns tipos de vibrômetros..... | 36 |
| Figura 14 - Tipos de acelerômetro utilizado atualmente..... | 37 |
| Figura 15 - A interface MATLAB..... | 39 |
| Figura 16 - Arduino Uno. | 41 |
| Figura 17 - Interface Principal do Arduino, o IDE | 42 |
| Figura 18 - Inspeção do carro arrancada no NUTENGE..... | 45 |
| Figura 19 - Motor utilizado para as medições de vibração..... | 45 |
| Figura 20 - Acelerômetro utilizado para teste no carro arrancada e amostra de dados para análise de dados. | 48 |
| Figura 21 - Placa de Arduino e o acelerômetro usados para a análise de vibrações no motor do carro arrancada..... | 49 |
| Figura 22 - Algoritmo utilizado na interface IDE, parte 1. | 50 |
| Figura 23 - Algoritmo utilizado na interface IDE, parte 2. | 50 |
| Figura 24 - Algoritmo utilizado na interface IDE, parte 3. | 51 |
| Figura 25 - Programação referente a vibração nos três eixos do motor e a vibração total do sistema. | 52 |
| Gráfico 26 - Relação entre a aceleração e a frequência de amostragem no sistema nos 3 Eixos do sistema motor-coxim-bancada..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 27 - Vibração total existente no sistema do motor utilizando os coxins como apoio. | 53 |
| Figura 28 - Ligação eletrônica com display. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Etapas do processo de medição | 44 |
| Tabela 2. Características do motor do carro arrancada | 46 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|----------------|--|
| ADV | - Absorvedor dinâmico de vibração |
| ADV's | - Absorvedores dinâmicos de vibrações |
| UEMA | - Universidade Estadual Do Maranhão |
| GDL | - Graus de liberdade |
| FIG | - Figura |
| EQ | - Equação |
| NUTENGE | - Núcleo Técnico de Engenharia |
| MATLAB | - Matrix Laboratory |
| IDE | - Ambiente de desenvolvimento do Arduino |
| TAB | - Tabela |

LISTA DE SÍMBOLOS

M - massa do braço

K - rigidez do braço

C - coeficiente de amortecimento do braço

x_r - coordenada de forçamento

x - coordenada da posição do braço

A - amplitude da coordenada de forçamento

Ω - frequência de forçamento

ω_n - frequência natural

ξ - fator de amortecimento

$\frac{\hat{x}}{A}$ - amplitude de vibração

$\left| \frac{\hat{x}}{A} \right|$ - módulo da amplitude de vibração

r - frequência de excitação normalizada.

SUMARIO

| | |
|---|------|
| Lista de ilustrações..... | ix |
| Lista de Tabelas | xi |
| Lista de siglas e abreviaturas..... | xii |
| Lista de Símbolos..... | xiii |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 1.2 Objetivo geral | 18 |
| 1.3 Objetivos específicos | 18 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 18 |
| 2.1 A vibração e a história..... | 18 |
| 2.2 Conceitos Básicos sobre Vibração..... | 20 |
| 2.3 Componentes Elementares de um Sistema Vibratório..... | 21 |
| 2.4 O Problema envolvendo um sistema com um grau de liberdade | 24 |
| 2.5 Coxim | 28 |
| 2.6 Absorvedores dinâmico de vibração | 30 |
| 2.6.1. Absorvedores dinâmico de vibração passivos | 31 |
| 2.6.2. Absorvedores dinâmico de vibração ativos..... | 31 |
| 2.6.3. Absorvedores dinâmico de vibração adaptativos..... | 31 |
| 3. ESCOLHAS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO | 32 |
| 4. ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE UM MOTOR | 33 |
| 5. SENSORES DE VIBRAÇÃO | 34 |
| 5.1 Vibrômetros..... | 36 |
| 5.2 Acelerômetros | 37 |
| 5.3 Sensor de Velocidade | 38 |
| 6 PROGRAMA MATLAB | 38 |
| 7 INTERFACE ARDUINO..... | 40 |
| 8 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES..... | 43 |
| 9 CARRO ARRANCADA | 44 |
| 10 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 47 |
| 10.1 Procedimento experimental | 47 |
| 10.1.1 Sensor Acelerômetro | 47 |

| | |
|---|----|
| 10.1.2 Arduino UNO e sua Interface..... | 48 |
| 10.1.3 Programa MATLAB..... | 51 |
| 11. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 55 |
| 12. RECOMENDAÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS..... | 56 |
| REFERÊNCIAS..... | 57 |
| APÊNDICE A- ALGORITMO UTILIZADO PARA COLETAR OS DADOS DO SENSOR..... | 59 |

1. INTRODUÇÃO

O estudo das vibrações é um campo de enorme importância para a engenharia mecânica, a análise de vibrações em máquinas e equipamentos possibilita o conhecimento de suas fontes excitadoras, de tal maneira, que podemos melhorá-los em rendimento, qualidade e desenvolvimento. A análise das vibrações também pode ser usada com a finalidade de reduzir as amplitudes de vibrações aos níveis aceitáveis ou até mesmo reduzindo-os consideravelmente.

Existem hoje várias estratégias de atenuação de vibrações de sistemas mecânicos que utilizam desde técnicas simples baseadas na introdução de materiais amortecedores passivos, modificação e otimização do projeto estrutural, até o uso de sofisticados sistemas de controle ativo em malha fechada. Neste contexto, o emprego de absorvedores dinâmicos de vibrações (ADVs), cuja invenção é devida a Frahm (1911), tem-se revelado uma estratégia eficiente e econômica. Por esta razão, os ADVs têm sido objeto da atenção de engenheiros e pesquisadores, tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial.

Segundo RAO [26], o absorvedor dinâmico de vibração consiste em um sistema “massa-mola” que deve ser acoplado ao sistema original. O sistema absorvedor deve ser projetado com o objetivo de remover o pico de ressonância da frequência natural original, e introduzir outros dois novos picos tornando o sistema original em um sistema dinâmico de dois graus de liberdade.

A metodologia utilizada será o levantamento de dados vibracionais no motor do carro arrancada, assim como pesquisas bibliográficas iniciais e finais para a realização das seguintes etapas:

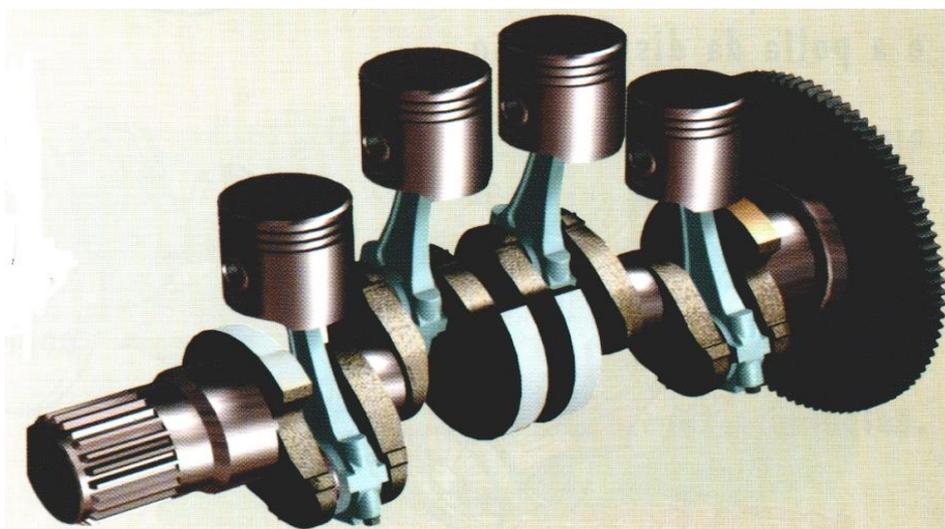
- A primeira etapa consiste em escolher um sensor capaz de obter dados sobre as amplitudes de vibrações em diversas partes do motor do carro arrancada, com isso verificar a excitação em uma frequência na faixa de ressonância.
- A segunda etapa é verificar em qual eixo o motor está com uma maior vibração.
- A terceira etapa é identificar os possíveis erros que está acontecendo com o sistema de apoio.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os sistemas mecânicos, em sua grande maioria, estão sujeitos a estímulos que induzem vibrações mecânicas. Estas vibrações, normalmente não são esperadas, podendo causar o desgaste prematuro do sistema em questão, a falha por fadiga e a emissão de ruídos. Esses diversos problemas fazem com que exista um grande interesse em solucioná-los, com o intuito de reduzir os níveis de vibrações.

Para que isso seja feito, é preciso eliminar a força de excitação do sistema, frequentemente isso não é possível. Pode-se tentar modificar a massa ou rigidez do sistema, no entanto, na maioria dos casos também não é possível. Outra forma seria o uso de técnicas de controle ativo, mas é uma técnica geralmente cara. Uma solução bastante viável, relativamente fácil de se empregar e de baixo custo financeiro, é o uso dos Absorvedores Dinâmicos de Vibração (ADVs). Nesse trabalho temos como problema o motor do carro arrancada da UEMA, que inicialmente está produzindo grandes amplitudes de vibrações no mecanismo pistão - biela – virabrequim (partes ilustradas na figura 1), passando assim as vibrações da parte interna para externa do automóvel.

Figura 1 - Pistões e volante do motor acoplados ao virabrequim.



Fonte: Apostila de Motor de Combustão Interna (SENAI CIMATEC), 2003.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em analisar e estudar as vibrações indesejadas no motor do carro arrancada da UEMA.

1.3 Objetivos específicos

São os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Analisar os níveis de amplitudes geradas nos 3 eixos motor do carro arrancada da UEMA.
- ✓ Identificar os possíveis erros existentes no sistema de apoio do motor através de sensores e programação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A vibração e a história

A percepção dos movimentos oscilatórios vem desde o início dos tempos da História da Humanidade. Instrumentos como apitos e tambores da antiguidade funcionava devido os princípios que rege os problemas vibratórios e tiveram muita importância entre os povos primitivos como meios de comunicação. Com o passar do tempo, diversos instrumentos musicais foram inventados, aproveitando movimentos vibratórios, propagadores de ondas sonoras.

O desenvolvimento da teoria da vibração resultou dos avanços das ciências básicas das quais deriva: matemática e mecânica geral. Origina-se desde os antigos filósofos do primeiro milênio antes de cristo, o primeiro problema da natureza vibratória registrado foi um incidente envolvendo Pitágoras de samos (cerca de 570-497 AC), a partir dos sons produzidos por martelos em uma forjaria. Ele realizou experiências com martelos, cordas, tubos e placas criando o primeiro laboratório de pesquisas em vibrações conhecido. (DIMAROGONAS,1992).

Os instrumentos de medição de vibrações se originam na Grécia e China antigas. Heródoto (cerca de 484 - 425 a.C.) registra a existência de um transdutor de

vibração (um escudo coberto com uma fina camada de bronze) que era encostado ao solo produzindo som quando este apresentava qualquer movimento vibratório. Era utilizado no sexto século a.C. para detectar a escavação de túneis subterrâneos em Barca, norte da África, atual Líbia, então sob dominação persa. Vários outros instrumentos podem ser citados, mas um merece especial atenção: um sismógrafo construído na China por volta do ano de 132 d.C, pela sua genialidade de saber em qual direção a vibração se propagava e por até os dias atuais continuar em funcionamento. (BALACHANDRAN, 2011).

Logo em seguida, no início da idade moderna, segundo (SOEIRO,2007) **Galileu** estabeleceu formalmente a relação entre o comprimento do pêndulo e o seu **período de oscilação** e, também, observou a ressonância entre dois corpos, conectados por algum meio de transferência de energia e sintonizados em uma mesma **frequência natural**, dando início para estudo de Wallis e Sauveur, na qual observaram, independentemente, o fenômeno das formas modais (com pontos estacionários, chamados nós) ao estudarem cordas vibratórias. Também descobriram que a frequência do segundo modo é o dobro da frequência do primeiro, a do terceiro é o triplo, etc. Bernoulli propôs um princípio que dizia “qualquer configuração da vibração livre é construída a partir das configurações das harmônicas individuais, agindo independentemente, com pesos variados”, chamado de princípio da superposição linear de harmônicas.

Nos séculos XVIII e XIX, o estudo da vibração teve uma grande contribuição com **Euler** e **Bernoulli**, e **Lord Rayleigh**. Devido a equação diferencial que governa a vibração lateral de barras prismáticas e o método de determinação da frequência fundamental de vibração de um sistema conservativo utilizando o princípio da conservação da energia, simultaneamente. E por fim, no século XX, **Frahm**, em 1909, propôs a adição de um sistema massa-mola (sistema secundário) para eliminar as vibrações de um outro sistema (sistema principal) que apresentava níveis altos de vibração, o sistema massa-mola foi denominado de absorvedor dinâmico de vibração.

Atualmente, o estudo de vibrações está sendo altamente influenciado pelo advento dos computadores digitais que proporcionaram a realização de grandes quantidades de cálculos em tempos pequenos, que é o assunto do nosso trabalho.

2.2 Conceitos Básicos sobre Vibração

Na engenharia, os movimentos oscilatórios fazem presentes principalmente nos elementos de máquinas e nas estruturas em geral. A vibração é caracterizada por movimentos periódicos ou aleatórios, que sempre se repete em um determinado intervalo de tempo. Para uma melhor compreensão desse assunto, torna-se preciso o estudo sobre as forças e/ou momentos relacionados ao movimento de oscilação de um corpo rígido em torno de uma posição de equilíbrio. (ALMEIDA, 1993).

Podemos classificar as vibrações em sistemas mecânicos das seguintes formas:

Conforme à excitação:

- **Vibrações Livres:** é quando um sistema vibra devido a uma excitação instantânea, ou seja, através de um deslocamento e/ou velocidade, só e só se existir condições iniciais, e sempre irá ocorrer a diminuição da amplitude de vibração.
- **Vibrações Forçadas:** é quando um sistema vibra devido a uma excitação constante, podendo ou não ocorrer a diminuição da amplitude de vibração.

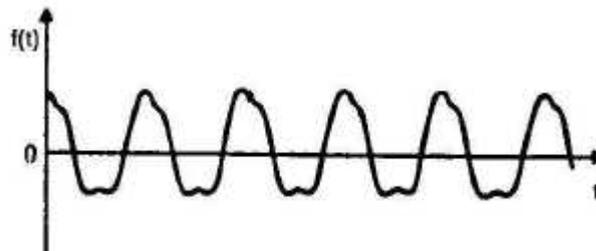
Conforme à Linearidade:

- **Vibrações Lineares:** satisfazem ao Princípio da Superposição dos Efeitos, ou seja, existe uma proporcionalidade entre excitação e resposta.
- **Vibrações Não-Lineares:** não satisfazem ao Princípio da Superposição.

Conforme à Previsibilidade de Ocorrência:

- **Vibrações Determinísticas:** é quando se obtém uma resposta previsível da intensidade da excitação em um determinado momento do tempo, denominando-se determinística (Figura 2).

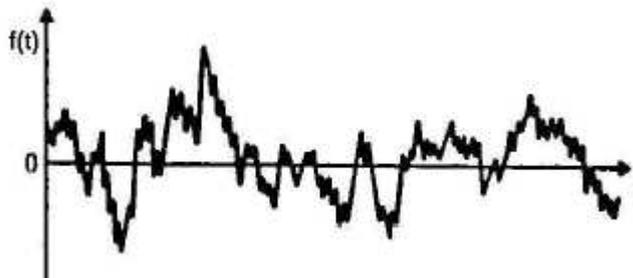
Figura 2- Exemplo de uma vibração determinística



Fonte: SOEIRO, 2007.

- **Vibrações Aleatórias:** é quando a resposta da intensidade da excitação em um momento do tempo é impossível de ser determinada, neste caso, a resposta é aleatória, probabilística ou random (Figura 3).

Figura 3 - Exemplo de uma vibração random.



Fonte: SOEIRO, 2007.

2.3 Componentes Elementares de um Sistema Vibratório

Podemos agrupar os movimentos vibratórios em dois tipos: discretos e contínuos. A diferença entre os dois é que um podem ser subdivididos em partes na qual cada uma delas possui um certo número de graus de liberdade, levando a um número finito de graus de liberdade do sistema, sendo esse chamado de sistemas discretos com parâmetros concentrados. E o outro não podem ser divididos,

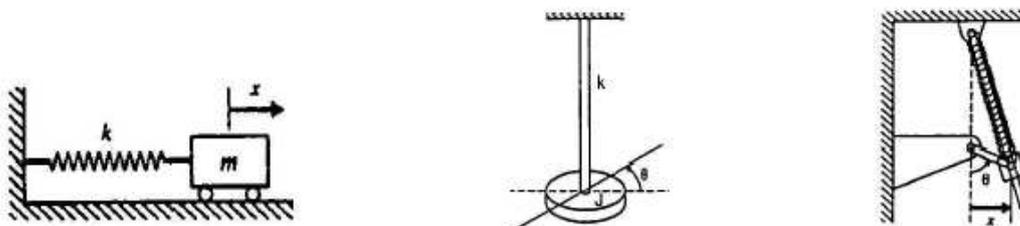
possuindo um número infinito de graus de liberdade sendo conhecido como sistemas contínuos ou com parâmetros distribuídos. (EHRICK,1993).

O número de graus de liberdade (GDL) utilizado para análise de um sistema mecânico é o número mínimo de coordenadas cinematicamente independentes necessárias para descrever completamente (localizar e orientar) o movimento de todas as partes que compõem o sistema vibratório em qualquer instante de tempo.

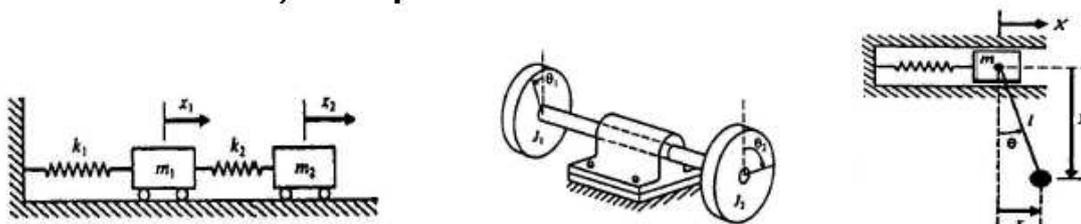
A escolha de um conjunto de coordenadas generalizadas não é única. Escolhe-se um sistema de coordenadas para que o movimento vibratório seja perfeitamente descrito, através das quantidades cinemáticas como: posições, velocidades e aceleração. Quantidades essas, todas em função das coordenadas generalizadas e de suas derivadas temporais. A Figura 4 ilustra os exemplos esquemáticos de sistemas com um, dois e três graus de liberdade.

Figura 4 - Exemplos esquemáticos de sistemas com graus de liberdade.

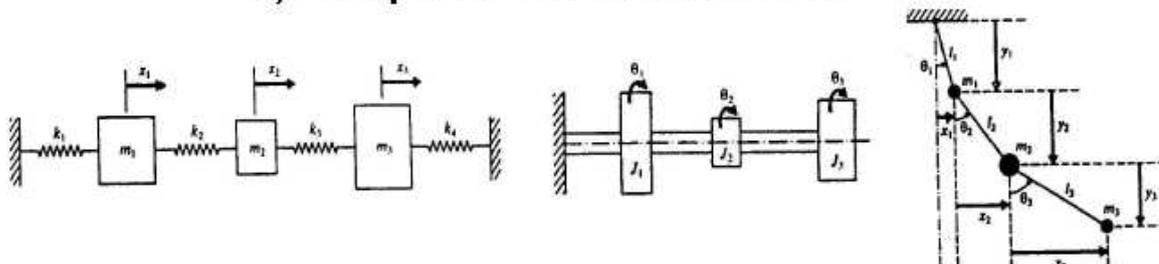
a) Exemplos de Sistemas com 1 GDL



b) Exemplos de Sistemas com 2 GDL



c) Exemplos de Sistemas com 3 GDL



Segundo informações obtidas do Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores (2008, p.10), diz que:

As propriedades mais importantes dos sistemas mecânicos sob o aspecto da vibração são a elasticidade, a inércia e o amortecimento. Isso porque a vibração é, em essência, um processo de troca de energia mecânica, nas formas de energia cinética (associada à velocidade) e energia potencial (associada à deformação e à gravidade). A elasticidade é uma característica que se relaciona com a capacidade do sistema de armazenar energia potencial elástica. A inércia, por sua vez, se liga à capacidade de armazenamento de energia cinética e, também, energia potencial gravitacional. O amortecimento, finalmente, provoca as perdas de energia em função das resistências passivas provocadas pelo atrito.

Com isso, fica claro que os componentes básicos de um sistema mecânico estão conectados entre si, e que manipulam a energia mecânica. Assim podemos classificar os elementos em:

- **Massas ou inércias:** consiste no elemento do sistema capaz de armazenar energia potencial gravitacional (relacionada à posição) e energia cinética (relacionada à velocidade), ou seja, de uma forma mais simplificada é um corpo rígido, podendo ganhar ou perder energia cinética conforme sua velocidade aumente ou diminua. Em muitos casos a energia relacionada a posição é normalmente desprezada quando se compara com a energia relacionada à velocidade. (SOTELO JR,2006).

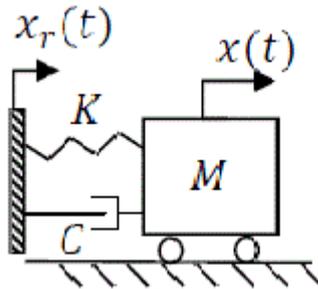
- **Molas:** esse elemento possui uma alta flexibilidade, capaz de sofrer grandes deformações quando submetido a uma força, fazendo com que se opõe à força que a ela está aplicada, armazenando a energia potencial elástica.

- **Amortecedores:** é o elemento do sistema mecânico que dissipa energia mecânica do mesmo, sob forma de calor e/ou som, basicamente a energia é retirada através do atrito entre as peças móveis do sistema e/ou pelo atrito interno entre as moléculas do sistema.

Resumindo, a vibração de um sistema envolve a conversão de energia potencial em energia cinética e vice-versa.

2.4 O Problema envolvendo um sistema com um grau de liberdade

Figura 5 - Movimento horizontal do sistema massa-mola-amortecedor com 1GDL.



Fonte: RIPPER NETO, 2007.

Na qual, cada letra equivale a um determinado conceito, sendo assim:

M - se trata da massa do braço;

K - se trata da rigidez do braço;

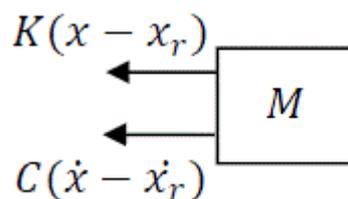
C - se trata do coeficiente de amortecimento do braço;

x_r - se trata da coordenada de forçamento;

x - se trata da coordenada da posição do braço;

A partir do diagrama de corpo livre podemos representar todas as forças externas atuando sobre a massa m , na direção x , mostrada na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de corpo livre referente ao sistema da fig. 5.



Fonte: RIPPER NETO, 2007.

Utilizando a lei de newton, temos:

$$M\ddot{x} = -K(x - x_r) - C(\dot{x} - \dot{x}_r) \quad (1.0)$$

Reagrupando alguns elementos, temos:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = C\dot{x}_r + Kx_r \quad (1.1)$$

Seja o termo de forçamento:

$$x_r = A \exp(j\Omega t) \quad (1.2)$$

Onde:

A - se trata da amplitude da coordenada de forçamento;

Ω - se trata da frequência de forçamento;

Colocando expressão de $x_r(t)$ na equação, obtemos:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = x_r = (j\Omega t + k)A \exp(\Omega t) \quad (1.3)$$

Através da simplificação temos:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = (2\xi\omega_n j + \omega_n^2)A \exp(\Omega t) \quad (1.4)$$

Na qual:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{e} \quad \xi = \frac{C}{2M\omega_n}$$

Depois disso afim de obter a função resposta através da equação do movimento obtida, usando a Eq.1.4, e supondo que $x = \hat{x} \exp(j\Omega t)$, tem-se :

$$\{-\Omega^2 + (2\xi\omega_n\Omega)j + \omega_n^2\}\hat{x} \exp(j\Omega t) = (2\xi\omega_n j + \omega_n^2)A \exp(\Omega t) \quad (1.5)$$

Sabendo que $r = \frac{\Omega}{\omega_n}$, e fazendo o rearranjo de termos, temos a amplitude de vibração:

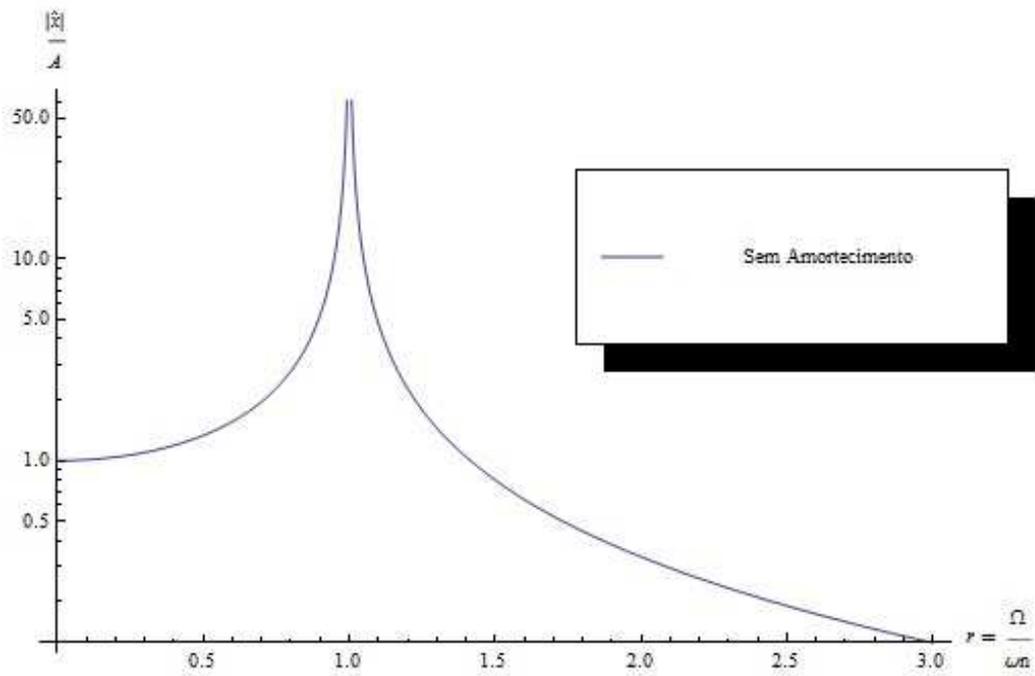
$$\frac{\hat{x}}{A} = \frac{1+j(2\xi r)}{(1-r^2)+j(2\xi r)} \quad (1.6)$$

Fazendo o módulo da amplitude temos:

$$\left| \frac{\hat{x}}{A} \right| = \sqrt{\frac{1+j(2\xi r)}{(1-r^2)+j(2\xi r)}} \quad (1.7)$$

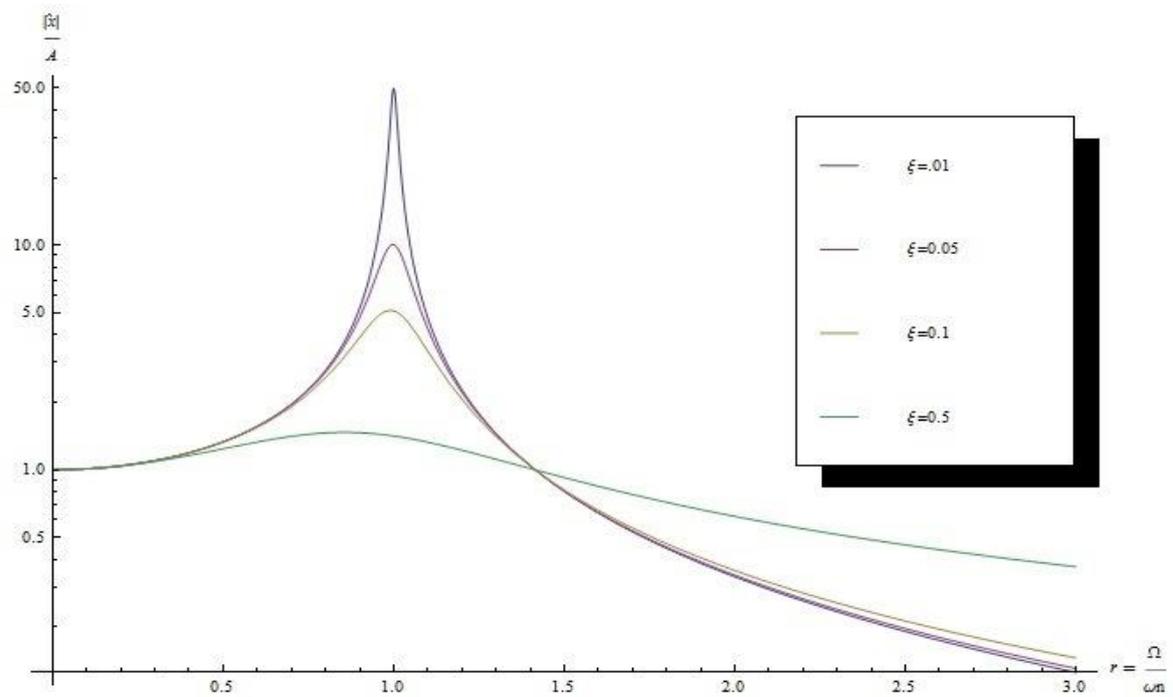
Com base a todas essas equações, foi possível plotar os gráficos da função resposta em frequência e a amplitude de vibração. Desde modo, é possível analisar um sistema sem o absorvedor dinâmico de vibração e desprovido de amortecimento, e plotar um gráfico a partir de diferentes valores do fator de amortecimento no ponto de atenuação máxima ($r = 1$), visto nas Figuras 7 e 8 abaixo.

Gráfico 7- Sistema sem ADV e com amortecimento nulo.



Fonte: MONTEIRO,2013.

Gráfico 8- Sistema sem ADV com amortecimento viscoso.

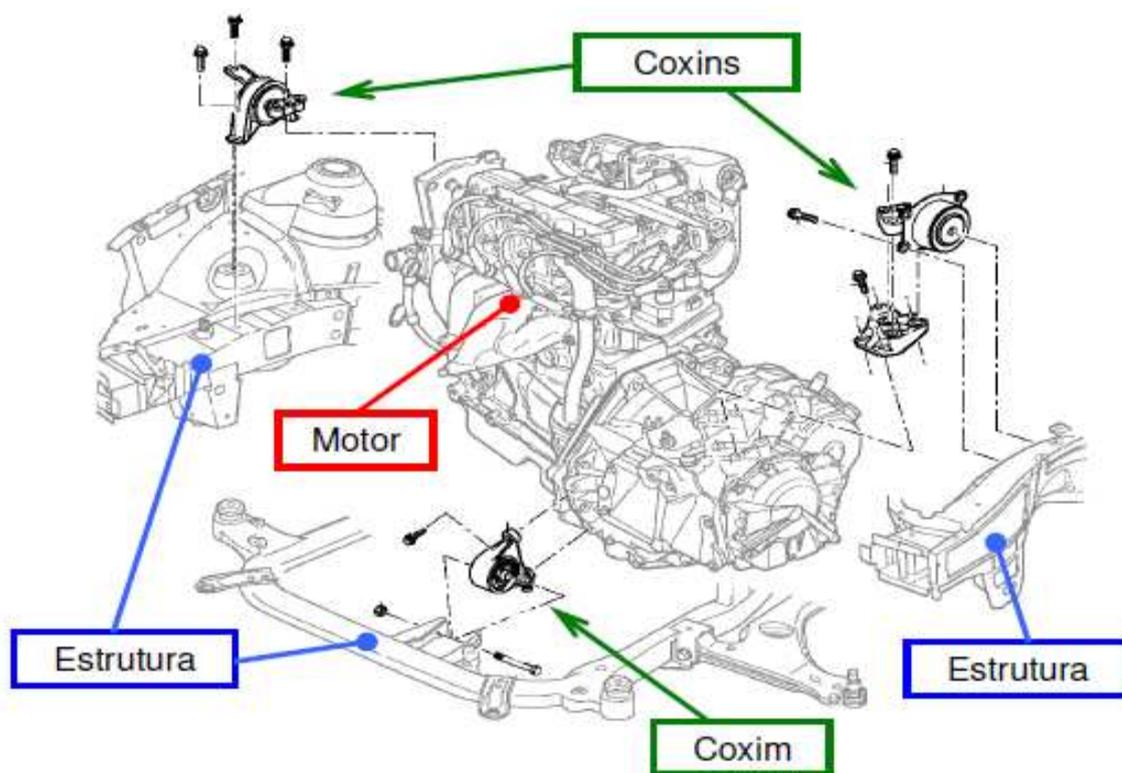


Fonte: MONTEIRO,2013.

2.5 Coxim

É um produto utilizado como base ou suporte para máquinas com grandes níveis de vibração, é feito de aço e borracha, com a menor quantidade de vinil possível. Em contato com o sistema ele possui muitas funções, dentre as quais se destacam: apoio do motor junto a estrutura do veículo, isolar a vibração do motor da carroceria e isolar o motorista e os passageiros dos ruídos e vibrações gerados pelo motor. Funções essas que Influenciam diretamente no conforto dos ocupantes, o sistema de apoio do motor é ilustrado através da Figura 9.

Figura 9 - Sistema de apoio do motor.



Fonte: BARBERTI, 2005.

Segundo Yu, Naganathan e Dukkipati (2001), o sistema de apoio do motor ainda necessita de melhoria devido a dois fatores:

O primeiro fator trata do nível requerido de isolamento de ruído e vibração para os passageiros do automóvel, devido à alta competição do mercado automotivo, exigindo níveis de amplitudes cada vez menores.

O segundo fator é que os projetos atuais tendem para uma carroceria mais leve com motores mais potentes. Isto implica em dois aspectos que continuamente estão em conflitos, logo a redução de peso e o aumento da potência do motor faz com que os níveis de vibração e ruídos conseqüentemente aumentem também. Então, o desafio é melhorar o desempenho do sistema de apoio do motor, para que acomode ou/e minimize tais conflitos. Diferentes tipos de coxins de motor, do elastomérico (convencional) ao hidráulico e do passivo ao ativo, têm sido desenvolvidos para melhoria do desempenho do sistema.

Segundo Rivin (1985), o principal objetivo do sistema de apoio é suportar o peso do motor. O centro de gravidade do motor não deve estar apoiado em somente um coxim, o apoio deve ser distribuído entre diversos coxins. Isto garantirá que o motor trabalhe livremente mantendo a posição determinada em projeto.

De acordo com Schmitt e Leingang (1976), devido à rotação do motor ocorrem excitações decorrentes dos seguintes fatores:

1. As forças inerciais das massas não balanceadas. Desbalanceamento dos componentes (pistão, biela e virabrequim) em movimento;
2. Transmissão de torque variável.

De acordo com Barberti (2005), a trepidação do motor é causada pelo o torque proveniente do pulso da combustão e que dependendo da rotação do motor, a quantidade de cilindros e tempos resultará a frequência da força.

Os coxins utilizados para análise de vibração neste trabalho foram do tipo elastoméricos, originais do GOL 94. Na Figura 10, é possível observar sua forma e a maneira que ele fica posicionado no sistema motor-coxim-bancada.

Figura 10 - Coxim original utilizado para a análise de vibração.



Fonte: Autor,2016.

2.6 Absorvedores dinâmico de vibração

Em sua forma mais simples, um ADV é um dispositivo de parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento que, uma vez acoplado a uma dada estrutura, cujas vibrações desejam-se atenuar, é capaz de absorver a energia vibratória no ponto de conexão (CUNHA JR, 1999). A invenção dos ADVs deve-se ao engenheiro alemão Hermann Frahm (FRAHM, 1911) Hermann estudou e utilizou um ADV de um grau de liberdade (GDL) usados no controle de vibrações torcionais em projetos de eixos de hélices de navios.

Os ADVs podem ser distribuídos em quatro categorias: i) ADVs passivos simples, ii) ADVs ativos, iii) ADVs adaptativos e iv) ADVs passivos multimodais.

Um resumo das categorias que serão apresentados nas seções 2.6.1 à 2.6.3.

2.6.1. Absorvedores dinâmico de vibração passivos

São considerados primeiramente os ADVs não amortecidos e amortecidos aplicados a sistemas primários de 1 grau de liberdade. Em seguida, adotando o procedimento proposto por Cunha Jr. (1999) a teoria clássica dos ADVs passivos é estendida ao caso de sistemas primários de vários graus de liberdade, mediante o desenvolvimento de uma formulação modal.

2.6.2. Absorvedores dinâmico de vibração ativos

Os absorvedores dinâmicos ativos, oferecem a possibilidade de atenuar vibrações em uma faixa mais ampla de frequências, com a vantagem de que a sintonização pode ser feita ajustando os ganhos de realimentação, sem alteração dos parâmetros físicos do ADV. Evidentemente, comparados aos ADVs passivos, a implementação prática dos ADVs ativos é mais complexa, envolvendo fatores importantes tais como a instabilidade, o sensoriamento e as estratégias de controle (HARVEY, 2002).

2.6.3. Absorvedores dinâmico de vibração adaptativos

Segundo Sun et al., (1995), os denominados ADVs adaptativos são entendidos como aqueles cujos parâmetros físicos podem ser variados (automaticamente ou com intervenção do operador) de modo que a assegurar sintonização em uma banda de frequências mais ampla. Nos casos em que a variação dos parâmetros é feita com a realização de algum trabalho externo, admite-se que esta variação seja feita num processo quase estático de modo que, em cada instante, o sistema possa ser modelado como um sistema de parâmetros físicos passivos de valores constantes. Esta hipótese assegura a estabilidade do sistema.

3. ESCOLHAS DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Antes de fazer uma análise de vibração é necessário considerar vários aspectos, a escolha errada dos instrumentos de medição irá ocasionar em leituras complicadas, de difícil compreensão e com erros. Os aspectos a serem analisados são:

1) Os níveis de frequências e amplitudes:

Os níveis de frequência e de amplitudes são um dos principais parâmetros para se determinar os instrumentos que serão utilizados em uma análise de vibração de um específico problema. Dentre esses instrumentos são considerados três sensores de vibração, sendo eles: vibrômetros, acelerômetros e medidores de velocidade. Nesse sentido Soeiro (2007), diz que os vibrômetros são mais adequados para medir as vibrações em baixas frequências, que é quando a amplitude de deslocamento normalmente é alta. Já em altas frequências as amplitudes de deslocamento são baixas e as amplitudes da aceleração são altas fazendo com que os acelerômetros apresentem maior sensibilidade. E por fim, os medidores de velocidade são de aplicação geral, pois apresentam desempenho razoável tanto em baixa como em alta frequência. Os medidores de velocidade são também, largamente utilizados por serem de fácil e barata construção.

2) Tamanho da máquina ou estrutura:

O tamanho do objeto na qual será utilizado para a análise deve ser levado em consideração, pois máquinas com uma grande massa quando comparadas com o instrumento de medição podem alterar os dados e acabar distorcendo as medidas de vibração.

3) Condição de operação da máquina:

Assim como as massas da estrutura tem que ser analisada, o ambiente em que se encontra a máquina é também de grande importância no momento de escolher o instrumento de medição. Pois muitas máquinas trabalham em

ambientes corrosivos, abrasivos e de altas ou baixas temperaturas. Caso passe despercebido essa análise, os instrumentos podem ser danificados no ato da medição, logo distorcendo os dados obtidos.

4) Tipo de análise dos dados:

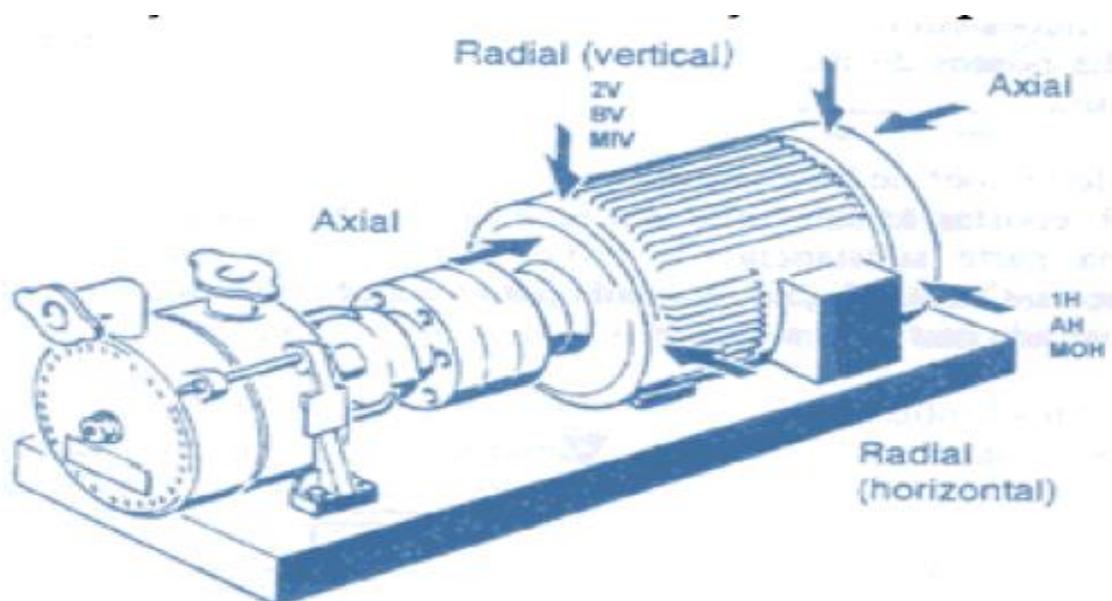
Antes de escolher o instrumento de medição, é fundamental saber primeiro qual tipo e a forma dos dados que querem obter em uma máquina. Muitas vezes é necessário a utilização de instrumentos mais sofisticado, por apresentar os dados de uma forma mais apropriada para a análise pretendida

4. ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE UM MOTOR

Para a análise da condição de funcionamento de qualquer equipamento, devem ser medidas e registradas as vibrações em cada uma das extremidades ou apoios. Nas três direções do espaço; vertical, horizontal e axial, assim como a codificação dos vários pontos de leitura. O nível de vibração na direção horizontal em geral é o mais alto, pois é o sentido em que as máquinas têm maior liberdade de movimento. Se o nível de vibração na direção vertical for maior do que na direção horizontal, geralmente existe um problema de fixação. Se houver um nível de vibração elevado na direção axial, pode estar ocorrendo desalinhamento. (TAYLOR, 2000).

A Figura 20, mostra de forma sucinta como é distribuída as três direções do espaço em um motor elétrico, o mesmo serve para qualquer outro motor, por exemplo o de combustão interna usada para esse trabalho.

Figura 11 - Posições padrões para medição da vibração.



Fonte: PREUMONT, 2002.

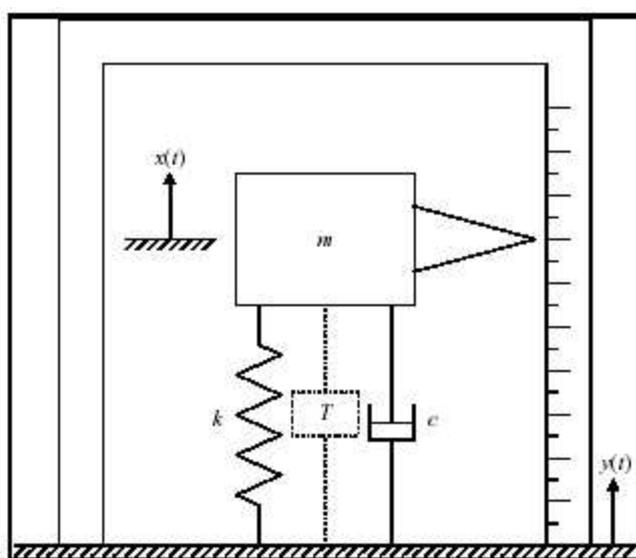
5. SENSORES DE VIBRAÇÃO

Segundo SEQUEIRA (2005), para a captação de vibrações, são utilizados sensores a que se dá o nome de transdutores de vibração mecânica. Os transdutores, transformam variáveis físicas em sinais elétricos equivalentes. Os tipos de transdutores dependem, fundamentalmente, da variável que os mesmos transformam. Existem vários tipos de sensores, sendo o acelerômetro, o mais utilizado devido à sua enorme versatilidade, enquanto outros sensores se resumem a aplicações muito específicas. Antes de se efetuar qualquer análise, a vibração tem de ser convertida num sinal elétrico, sendo essa tarefa desempenhada pelos transdutores. Estes convertem uma forma de energia (sinal vibratório mecânico existente na superfície da máquina), em uma outra forma de energia, normalmente em sinais elétricos característicos da vibração do equipamento, cuja forma de onda está relacionada com o movimento mecânico. Os transdutores são colocados em diversos pontos da máquina, para recolhas nas direções radial e axial, podem ser utilizados de várias

formas, através de base ponteira, base magnética, base roscada ou colada para um controle permanente.

Um sensor de vibração é um instrumento composto de um mecanismo medidor associado a um transdutor. A Figura 12 exibe um instrumento sísmico montado em um corpo vibratório. O movimento vibratório é medido achando-se o deslocamento da massa em relação à base na qual é montado.

Figura 12-Funcionamento de um sensor de vibração.



Fonte: Curso de fundamentos de vibrações e Balanceamento de rotores,2008.

Segundo Soeiro (2007), os vibrômetros são compostos por um sistema de massa-mola-amortecedor normal, com uma massa m , uma mola de rigidez k e de um amortecedor de constante de amortecimento c , todos os elementos são colocados em uma caixa, e a mesma entra em contato com o sistema vibratório. Na qual as extremidades da mola e do amortecedor efetuam o mesmo movimento que a caixa (movimento y), e a sua vibração excita a massa que está no interior da caixa. E o movimento da massa é igual $x = z + y$, logo o movimento da massa em relação a caixa é dado pela variável z .

5.1 Vibrômetros

Os vibrômetros são utilizados para medir as vibrações e oscilações em máquinas, equipamentos, instalações residenciais, e por fim desenvolver produtos como partes de componentes ou ferramentas. As saídas das medições têm como base as variáveis mecânicas como: aceleração, velocidade e variação de vibração, sendo assim possível obter as vibrações com precisão. Os vibrômetros são portáteis e seus resultados podem ser armazenados parcialmente, sendo recomendado a calibração constantemente, dependendo do tipo que será utilizado. (SOTELO,2006) Na Figura 13, é possível identificar alguns dos mais variados e utilizados tipos de vibrômetros existentes. Os vibrômetros são de grande ajuda para um profissional, sendo capaz de identificar problemas técnicos em campos da indústria onde se faz necessário medições mais exigentes.

Figura 13 - Alguns tipos de vibrômetros.



5.2 Acelerômetros

O acelerômetro é um transdutor que produz em sua saída uma tensão proporcional à aceleração a que ele está submetido. Nos acelerômetros utilizados, a aceleração é medida por meio de elementos capacitivos construídos na forma de diversas placas de silício móveis em seu interior (DIMAROGONAS, 1992). Dentro do circuito integrado existe um circuito de controle que desempenha as funções de medição, calibração, filtragem e amplificação do sinal produzido pelo elemento sensor capacitivo. As saídas dos acelerômetros são função da tensão de alimentação e do valor da aceleração medida e expressa em função da aceleração da gravidade (g) (IEEE Std 836-2001). Diversas são as possibilidades de saída do acelerômetro, frente às orientações com a gravidade. Os mais variados tipos de acelerômetros utilizados estão sendo mostrado na Figura 14 a baixo.

Figura 14 - Tipos de acelerômetro utilizado atualmente.



Os acelerômetros são amplamente utilizados em medições de vibrações industriais e terremotos. Eles possuem grandes vantagens com relação aos outros tipos de sensores, tais como: a velocidade e o deslocamento podem ser obtidos por integração da aceleração, o que é computacionalmente fácil, a ampla gama de frequências utilizáveis 1 à 10 000 Hz superior a qualquer dos anteriores transdutores, fáceis de instalar e no geral são mais pequenos e leves do que os anteriores, por isso foi feita a escolha desse sensor para executar o trabalho, logo, são os melhores instrumentos para se medir vibrações. (RIPPER NETO,2007).

5.3 Sensor de Velocidade

De acordo com Sequeira (2005), este sensor mede a velocidade do corpo vibratório. Os sensores de velocidade são extremamente utilizados para medir a vibração na área de manutenção em indústrias, logo normalmente possuem um preço acessível e são de fácil construção (transdutores eletromagnéticos). O sensor de velocidade é de aplicação mais restrita devido ao seu peso e fragilidade de componentes internos. Apesar de só possibilitar a recolha de frequências entre 10 e 1000 Hz, apresenta como grande vantagem o fato de ser auto-gerador, o que permite enviar o sinal elétrico a grandes distâncias por cabo, permitindo trabalhar a altas temperaturas.

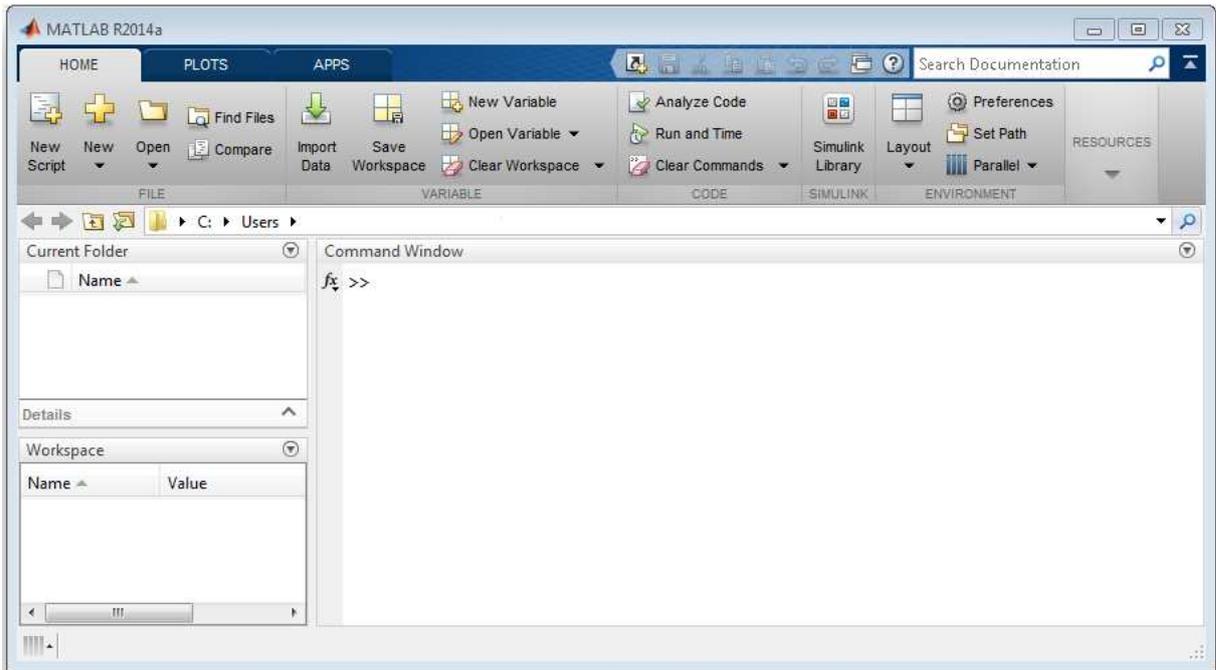
6 PROGRAMA MATLAB

De acordo com Matsumoto (2004), o MATLAB é um software criado para desenvolver e implementar algoritmos numéricos ou simbólicos capaz de construir gráficos de até três dimensões. Além disso contribui para o processamento de sinais e manipulação de funções especializadas. O programa apresenta ao usuário um ambiente de alto nível de programação para estudo e pesquisa nas diversas áreas das ciências exatas.

Esse software está disponível para quase todos os sistemas operacionais em uso, com uma linguagem procedural de programação análogas aos do FORTRAN, ANSI C e do Pascal. O próprio usuário pode construir suas próprias ferramentas reutilizáveis através da escrita de suas próprias funções e programas especiais

conhecidos como arquivos”. m.”, por causa disso e de suas funções o MATLAB tornou-se quase que uma ferramenta padrão em cursos introdutórios e avançados de Álgebra Aplicada, Processamento de Sinais, Sistemas de Controle, Estatística e inúmeras outras áreas do conhecimento (KATSUHIKO OGATA,1997).

Figura 15 - A interface MATLAB



Fonte: Autor,2016.

Através da Figura 15, é capaz de observar o Ambiente MATLAB, e suas três principais plataformas que serão citadas e explicadas a seguir:

- a) **Command Window:** É o principal local da interface, é a plataforma de comandos onde as instruções serão feitas.
- b) **Workspace:** É a plataforma destinada às variáveis que ficarão gravadas na memória, sendo assim possível visualizar o nome, valor e classe da mesma.
- c) **Command History:** Essa plataforma trata-se de um histórico de todos os comandos realizados, separados por data de execução, permitindo assim que o comando possa ser realizado novamente a qualquer momento.

A primeira versão do MATLAB foi escrita em 1970, com poucos comandos e somente com algumas utilizações. Atualmente tornou-se uma ferramenta bastante

explorada com foco nas áreas de cálculos matemáticos, simulação e visualização de dados e gráficos de engenharia. Se tornando um programa de grande contribuição para o termino deste trabalho.

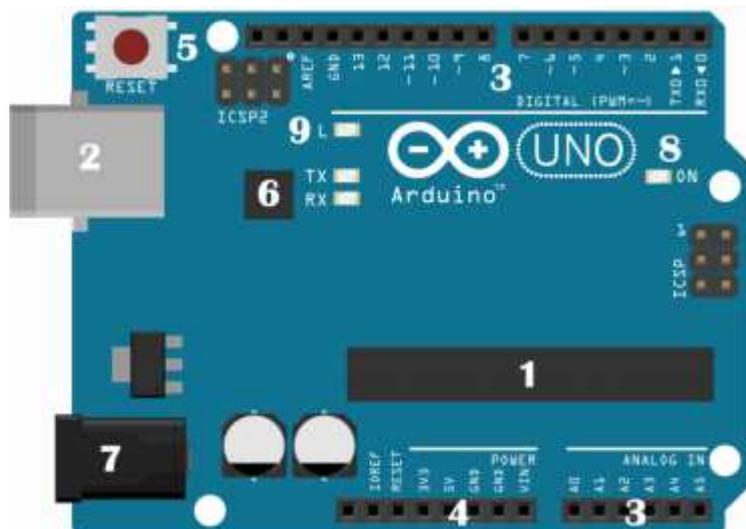
7 INTERFACE ARDUINO

Segundo Hughes (2016), o Arduino consiste-se em uma plataforma de prototipagem de circuitos eletrônicos com hardware e software bem flexíveis e fáceis de manusear, foi criado em 2005 na Itália por Massimo Banzi e David Cuartielles, e tem como objetivo facilitar e melhorar o desenvolvimento de projetos relacionado a diversas funções como: controlar sensores, motores, leds, automação e etc. Criando assim desde os mais simples aos mais complexos projetos. Com esta plataforma, qualquer um pode ser um criador de tecnologia, não precisa ter um conhecimento sobre matérias complexas de engenharia para isso.

Quando se trata de Arduino, existem vários tipos de placas e com várias especificidades de hardware. O site oficial do Arduino lista os seguintes tipos: Arduino UNO, Arduino Leonardo, Arduino Due, Arduino Esplora, Arduino Mega, Arduino Mega ADK, Arduino Ethernet, Arduino Mini, Arduino LilyPad, Arduino Micro, Arduino Nano, Arduino ProMini, Arduino Pro, Arduino Fio, são utilizados em diversas aplicações de sistemas embarcados, tais como: carros, eletrodomésticos, aviões, automação residencial, etc.

Na Figura 16, é possível observar cada peça eletrônica que compõe a placa de Arduino, em um todo, essa é parte externa do projeto que recebe o nome de Hardware. Após uma análise de cada peça é possível perceber que se trata de um computador, porém em menor escala.

Figura 16 - Arduino Uno.



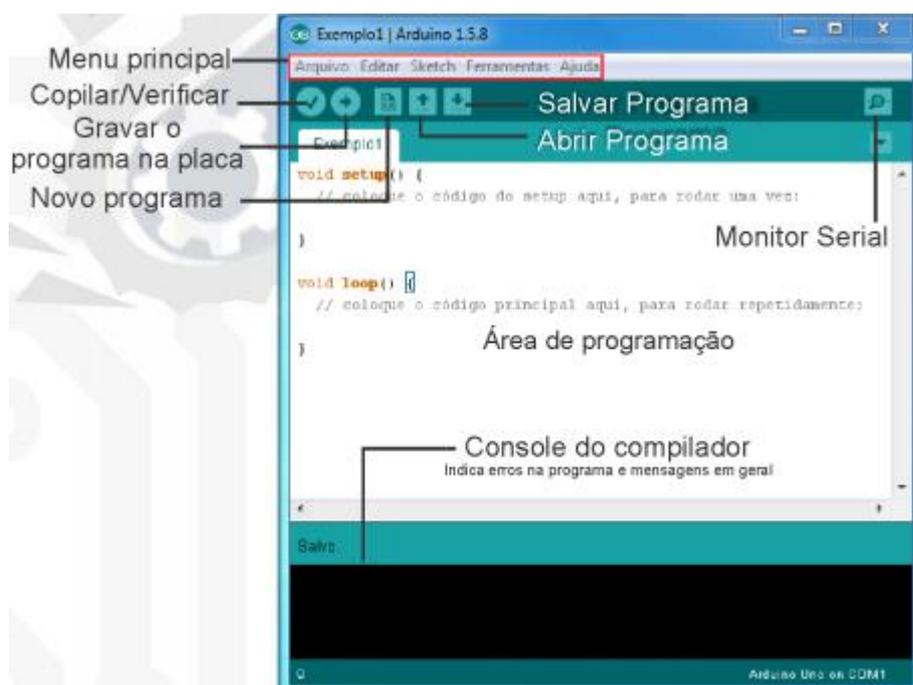
Fonte: Vida de Silício, Apostila Arduino,2014.

Os blocos enumerados que compõe a placa se trata dos: **1 Micro controlador:** o cérebro do Arduino, é o dispositivo capaz de programar onde roda o código que enviamos à placa. **2. Conector USB:** local por onde o computador e o Arduino transferem informações através do cabo USB e energia para placa. **3. Pinos de Entrada e Saída:** Pinos que funcionam como entradas ou saídas, fazendo com que o Arduino interaja com o meio externo. **4. Pinos de Alimentação:** tem a função de enviar tensão elétrica para os componentes externos, possibilitando os seus funcionamentos. **5. Botão de Reset:** função de reiniciar a placa Arduino. **6. Conversor Serial-USB e LEDs TX/RX:** Chip responsável por traduzir as informações entre computador e o micro controlador. Os LEDs TX e RX acendem identificando que a placa está enviando e recebendo dados pela porta serial respectivamente. **7. Conector de Alimentação:** Responsável por receber a energia de alimentação externa. **8. LED de Alimentação:** Indica se a placa está energizada. **9. LED Interno:** LED conectado ao pino digital 13. (McROBERTS, 2013).

Saindo do Hardware e entrando na parte interna chamada software, temos a interface chamada IDE o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino, consiste em um ambiente onde podemos desenvolver programas e enviar para a nossa placa. Uma das grandes vantagens é a linguagem baseada no C/C++, linguagem bem utilizada pela sociedade em diversos cursos, com estrutura simples e de fácil

aprendizagem. Além de ser um programa open-source, ou seja, qualquer pessoa pode utilizar e reproduzir os projetos eletrônicos e bibliotecas disponível no Arduino sem a restrição dos direitos autorais (JUSTEN, 2014).

Figura 17 - Interface Principal do Arduino, o IDE



Fonte: (JUSTEN, 2014)

Na Figura 17 é possível observar as partes principais da interface do Arduino e as duas principais funções para desenvolver um programa, que são elas: `setup()` e `loop()`, qualquer programa utilizado no Arduino deve conter estas duas funções. O `setup()` é o local onde são definidas as configurações iniciais do programa, já o `loop()` pode se dizer que é o local principal do programa, lugar onde a função definida nesse campo irá repetir várias vezes, o quanto solicitar. Resumindo é um programa de fácil utilização e compreensão. De acordo com Ricardo (2015), A interface IDE do Arduino tem como funções primordiais: permitir o desenvolvimento do software, de enviá-lo à placa para que possa ser executado e de se interagir com a placa Arduino. De uma forma mais simplificada trata-se das seguintes etapas: escrever o código do programa, salvar o código do programa, compilar um programa e transportar o código compilado para a placa do Arduino.

Com a criação do Arduino a tecnologia e as formas de pesquisas ganharam novos rumos, é notável que a placa é bastante eficiente e poderosa. É possível utilizá-lo para controlar, monitorar, automatizar, etc. Existem vários projetos que melhoraram suas eficiências com a utilização dessa placa, como por exemplo: o monitoramento da qualidade do ar, medição da temperatura de um líquido, sistemas de irrigação, robôs, impressoras 3D, dentre vários outros.

8 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

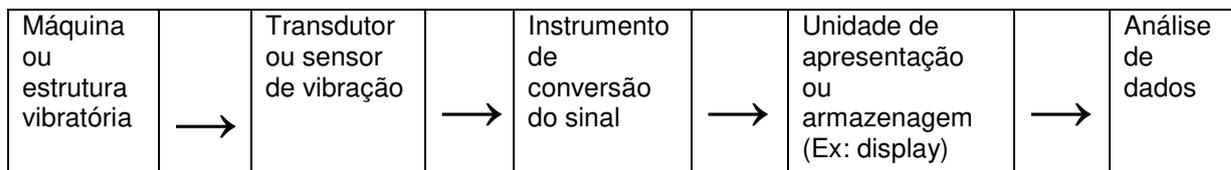
No curso de engenharia mecânica, as vibrações têm uma grande importância na área de manutenção de máquinas e equipamentos, a sua presença geralmente significa uma perda no desempenho. Para isso estudamos sobre a manutenção preditiva, corretiva e preventiva. Mas é na preditiva onde se tem uma maior atenção a análise qualitativa e quantitativa das vibrações. Normalmente, o estudo das vibrações deve seguir por três etapas básicas: a medição da vibração; a análise do sinal vibratório medido; e o controle da vibração.

Através do processo de medição obtemos dados para a análise das vibrações de um sistema, é de grande importância que a medição seja feita corretamente para que o controle da vibração não seja comprometido. Este processo funciona afim de garantir não só o bom funcionamento de máquinas, mas também ajudar em pesquisas, confirmar suposições teóricas, identificar problemas através da medição de variáveis de entrada e saída, discernir informações sobre futuros terremotos, analisar os fenômenos naturais em estruturas, acompanhar o estado das máquinas e equipamentos no processo de manutenção e etc.(HARTOG,1972).

O processo de medição, ilustrado na Tabela 1, resume como a identificação característica de um sistema vibratório venha a ser medido, normalmente ao executar esse processo deseja-se encontrar uma variável mecânica, como o deslocamento, velocidade, aceleração ou força. Segundo (INMAN,2008), o instrumento que interage com a máquina ou estrutura afim de obter as variáveis é o transdutor, através dele é possível converter o sinal mecânico em um sinal elétrico (corrente elétrica) que é amplificado e convertido em um sinal digital, assim torna se capaz de mostrar e

armazenar os dados obtidos em um computador. Ainda antes de sofrer a conversão para digital, o sinal pode ser gravado em um gravador especial. Após armazenados, os dados estão disponíveis para a análise.

Tabela 1- Etapas do processo de medição



Fonte: Autor,2016.

9 CARRO ARRANCADA

O carro arrancada é um automóvel que faz parte de um dos programas de extensão científica da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), trata-se de um GOL 94, motor AP modificado, que a princípio foi criado com o objetivo de fazer com que os alunos pudessem ter um contato maior com área automobilística, além disso, de incentivar os discentes a buscarem um maior conhecimento sobre o seu curso e participarem de competições nacionais contra outras universidades. A Figura 18 mostra o carro arrancada sendo utilizado para inspeção no NUTENGE, a Figura 19 mostra o motor utilizado para análise de vibrações existentes no carro arrancada e na Tabela 2 temos as especificações do motor.

Figura 18 - Inspeção do carro arrancada no NUTENGE.



Fonte: Autor,2016.

Figura 19 - Motor utilizado para as medições de vibração.



Fonte: Autor,2016.

Tabela 2 - Características do motor do carro arrancada

| Dados técnicos | medidas | Unidades |
|--|----------------|----------------------|
| Curso do pistão | 88,000 | mm |
| Altura excedente do bloco | 1,190 | mm |
| Curso estimado total | 89,190 | mm |
| Cilindro do bloco-Diâmetro | 85,000 | mm |
| Pistão-diâmetro | 84,180 | mm |
| Cilindrada por cilindro(curso 88,00) | 499,356 | cc |
| Cilindrada total (curso 88,00) | 1997,423 | cc |
| Volume da câmara de combustão por cilindro(curso 88,00) | 25 | ml = cm ³ |
| Volume câmara de combustão total (curso 88,00) | 100 | ml = cm ³ |
| Taxa de compressão(curso 88,00) | 20,97 | : 1 |
| Cilindrada por cilindro(curso 89,19) | 506,108 | cc |
| Cilindrada total (curso 89,19) | 2024,434 | cc |
| Volume da câmara de combustão por cilindro(curso 89,19) | 25 | ml = cm ³ |
| Volume câmara de combustão total (curso 89,19) | 100 | ml = cm ³ |
| Taxa de compressão(curso 89,19) | 21,24 | :1 |

Fonte: Autor,2016.

10 MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo, o lugar escolhido para fazer a análise das vibrações foi o sistema de apoio do carro arrancada da UEMA. Para a análise de vibrações, de uma maneira externa, foram utilizados os seguintes materiais: um sensor (acelerômetro), uma placa de Arduino (UNO) e um computador. O objetivo foi medir a vibração com ajuda desse sistema, para que assim fosse possível analisar os níveis de amplitudes geradas no motor e identificar os possíveis erros existentes no sistema de apoio.

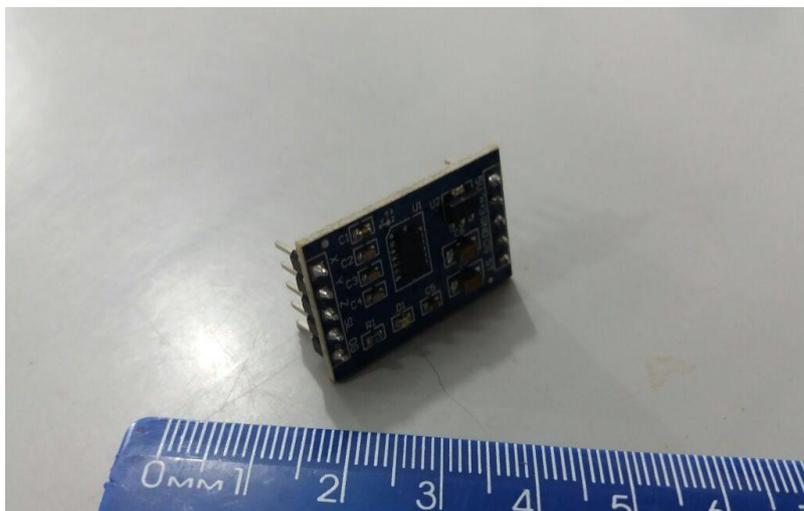
10.1 Procedimento experimental

O primeiro passo foi instalar no sistema motor-coxim-bancada o acelerômetro juntamente com o Arduino para ser feito a análise de vibração, para a análise da condição de funcionamento de qualquer equipamento, deve ser medidas e registadas as vibrações em cada uma das extremidades ou apoios. No entanto como o Arduino utilizado trabalhava em três dimensões não era preciso colocá-lo em vários lugares para a coleta de dados.

10.1.1 Sensor Acelerômetro

No estudo será feita a análise das vibrações no bloco do motor do carro arrancada, os acelerômetros apresentam um comportamento de amplitude constante sobre todas as frequências, e, portanto, podem ser empregados para detectar sinais de intensidades de frequência baixa e alta, um efeito favorável se observarmos a condição de equilíbrio. A Figura 20, mostra o acelerômetro utilizado para coleta de dados.

Figura 20 - Acelerômetro utilizado para teste no carro arrancada e amostra de dados para análise de dados.

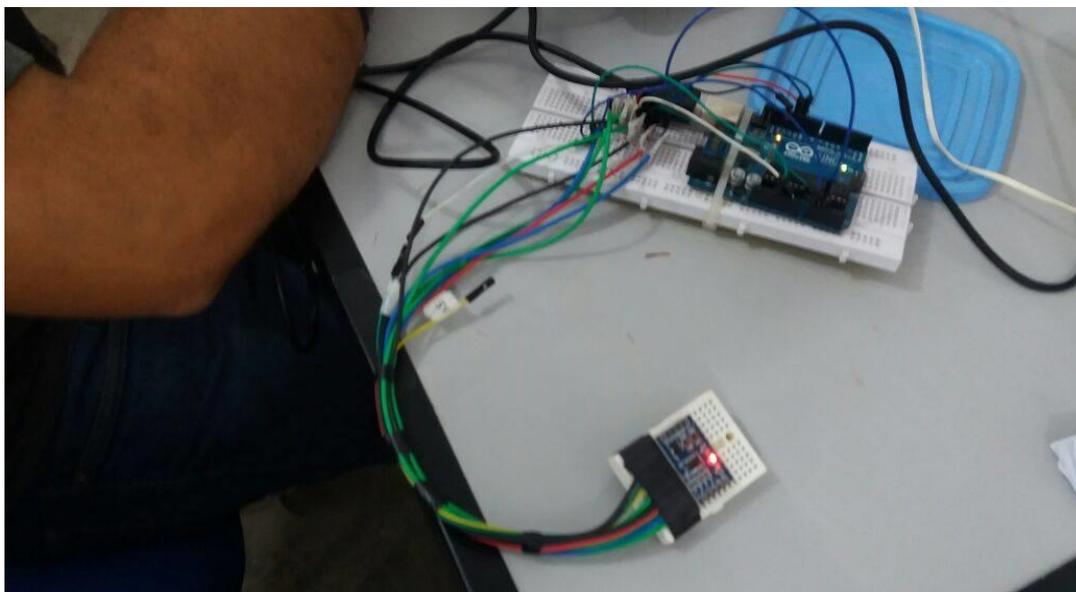


Fonte: Autor,2016.

10.1.2 Arduino UNO e sua Interface.

Para a coleta de dados foi utilizado um tipo básico de Arduino, o UNO, porém muito eficiente para o trabalho, mostrado na Figura 21. É possível observar o sistema de medição sobre a bancada para testes e calibragem. Deixando a parte externa de lado, para coletar os dados foi preciso utilizar a interface IDE do Arduino e o programa MATLAB.

Figura 21 - Placa de Arduino e o acelerômetro usados para a análise de vibrações no motor do carro arrancada.



Fonte: Autor,2016.

Com o Arduino conectado ao computador e devidamente configurado, para que os dados fossem gerados e extraídos do acelerômetro foi necessário criar um algoritmo na IDE do Arduino. As Figuras 22,23 e 24 a seguir, ilustram por partes o algoritmo feito para coletar a aceleração nos três eixos do acelerômetro.

Figura 22 - Algoritmo utilizado na interface IDE, parte 1.

```

vibra_o | Arduino 1.6.8
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

vibra_o
//Programa : Teste Acelerometro MMA7361
//Botão interativo para inicio do programa

#include <AcceleroMMA7361.h> //Carrega a biblioteca do MMA7361

int button =9;
int ledgreen =6;
int ledred=5;
//int janela=3000;
AcceleroMMA7361 accelero;
int tempo=0;
int pausa=1;
int t;
int x;
int y;
int z;
unsigned long tempo_de_espera;
int estado;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  accelero.begin(13, 12, 11, 10, A0, A1, A2);
  //Seta a voltagem de referencia AREF como 3.3V
  accelero.setRefVoltage(3.3);
  //Seta a sensibilidade (Pino GS) para +/-6G
  accelero.setSensitivity(LOW);
}

```

Fonte: Autor,2016.

Figura 23 - Algoritmo utilizado na interface IDE, parte 2.

```

vibra_o | Arduino 1.6.8
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

vibra_o
//Seta a voltagem de referencia AREF como 3.3V
accelero.setRefVoltage(3.3);
//Seta a sensibilidade (Pino GS) para +/-6G
accelero.setSensitivity(LOW);
accelero.calibrate();
pinMode(button,INPUT);
pinMode(ledgreen,OUTPUT);
pinMode(ledred,OUTPUT);
estado = LOW;
}

void loop()
{
  estado = digitalRead(button);
  if(((estado == HIGH || tempo > 0) && (tempo <= 1000))){
    digitalWrite(ledred,HIGH);
    digitalWrite(ledgreen,LOW);
    x = accelero.getXAccel(); //Obtem o valor do eixo X
    y = accelero.getYAccel(); //Obtem o valor do eixo Y
    z = accelero.getZAccel(); //Obtem o valor do eixo Z
    //Serial.print("x: "); //Mostra os valores no serial monitor
    Serial.print(x);
    Serial.print(" \t ");
    //Serial.print(y);
    //Serial.print(" \t ");
    //Serial.print(z);
    //Serial.print(" \tG*10^-2");
    delay(pausa);
    //Serial.print("Tempo:");
  }
}

```

Fonte: Autor,2016.

Figura 24 - Algoritmo utilizado na interface IDE, parte 3.

```

vibra_o
pinMode(ledgreen,OUTPUT);
pinMode(ledred,OUTPUT);
estado = LOW;
}

void loop()
{
  estado = digitalRead(button);
  if((estado == HIGH || tempo > 0) && (tempo <= 1000)){
    digitalWrite(ledred,HIGH);
    digitalWrite(ledgreen,LOW);
    x = accelero.getXAccel(); //Obtem o valor do eixo X
    y = accelero.getYAccel(); //Obtem o valor do eixo Y
    z = accelero.getZAccel(); //Obtem o valor do eixo Z
    //Serial.print("\nX: "); //Mostra os valores no serial monitor
    Serial.print(x);
    Serial.print(" \t ");
    //Serial.print(y);
    //Serial.print(" \tz: ");
    //Serial.print(z);
    //Serial.print("\nG*10^-2");
    delay(pausa);
    //Serial.print("\nTempo:");
    //Serial.print(tempo);
    tempo = tempo + pausa;
  }
}

```

Fonte: Autor,2016.

10.1.3 Programa MATLAB

Depois de coletar os dados do acelerômetro, transferir para uma pasta no Excel, e exportar do Excel para o programa MATLAB, foi realizado a plotagem dos gráficos através de uma programação simples, porém de grande utilidade para a conclusão do trabalho. O Arduino serviu como uma ponte de ligação entre o sensor e a interface do MATLAB, sendo assim, foi possível fazer uma relação entre as seguintes variáveis: aceleração e frequência de amostragem. Os Gráficos 26 e 27, são referentes a programação utilizada na Figura 25. A Figura 26 mostra os três eixos do Arduino coletados em uma determinada frequência de amostragem e aceleração provinda do motor do carro, sendo identificada os Eixos como: X (Axial, vermelho), Y (Horizontal, verde), Z (Vertical, azul).

Figura 25 - Programação referente a vibração nos três eixos do motor e a vibração total do sistema.

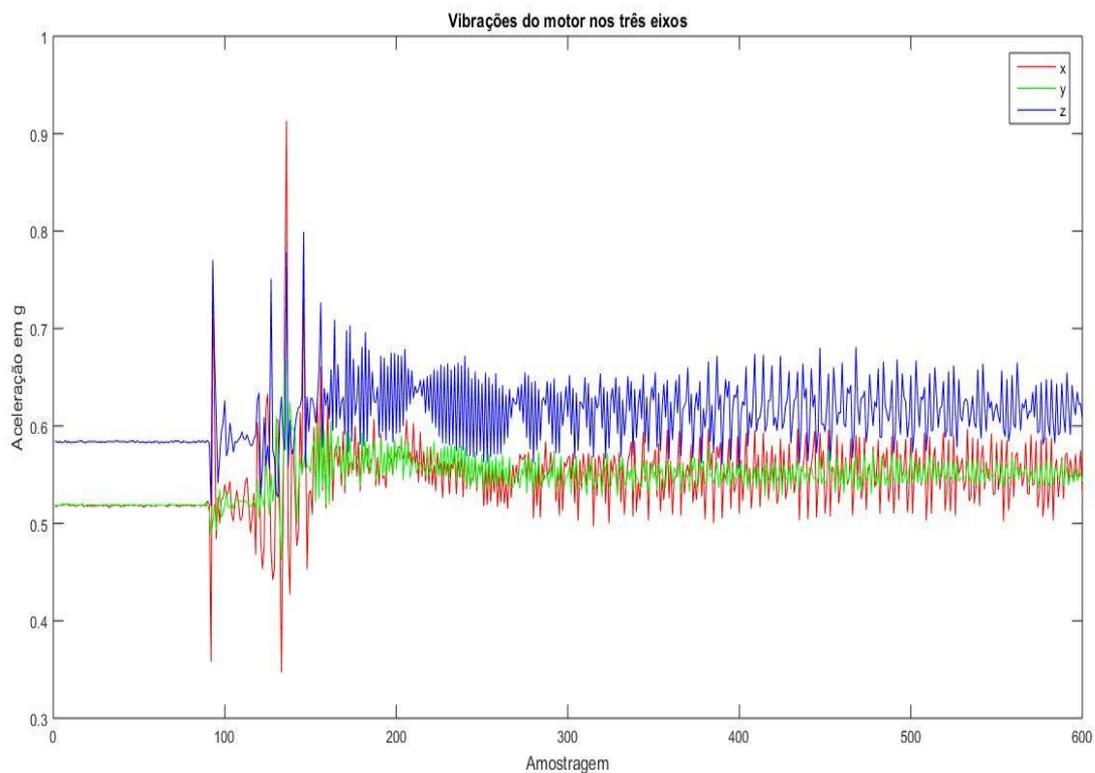
```

1. %=====
2. %           SCRIPT PARA PLOTAGEM DAS ACELERAÇÕES
3. %=====
4.
5. % importação dos dados da planilha excel
6. valores=xlsread('aceleracao.xlsx');
7.
8. % extração dos valores de vibração em x, y e z;
9. vibracao_x=valores(1,+)/1000;
10. vibracao_y=valores(2,+)/1000;
11. vibracao_z=valores(3,+)/1000;
12.
13. % quantificação dos valores de vibração total
14.
15. vibracao_total=[];
16. for i=1:size(valores,2)
17. total=norm([vibracao_x(i),vibracao_y(i),vibracao_z(i)]);
18. vibracao_total=[vibracao_total total];
19. end
20.
21. % plotagem doas vibrações nos três eixos
22. figure(1)
23. plot(vibracao_x,'r')
24. hold on
25. plot(vibracao_y,'g')
26. hold on
27. plot(vibracao_z,'b')
28. xlabel('Amostragem')
29. ylabel('Aceleracao em g')
30.
31. % plotagem da vibracao total
32. figure(2)
33. plot(vibracao_total);
34. xlabel('Amostragem')
35. ylabel('Aceleracao em g')
36. title('Vibracao total')
37.

```

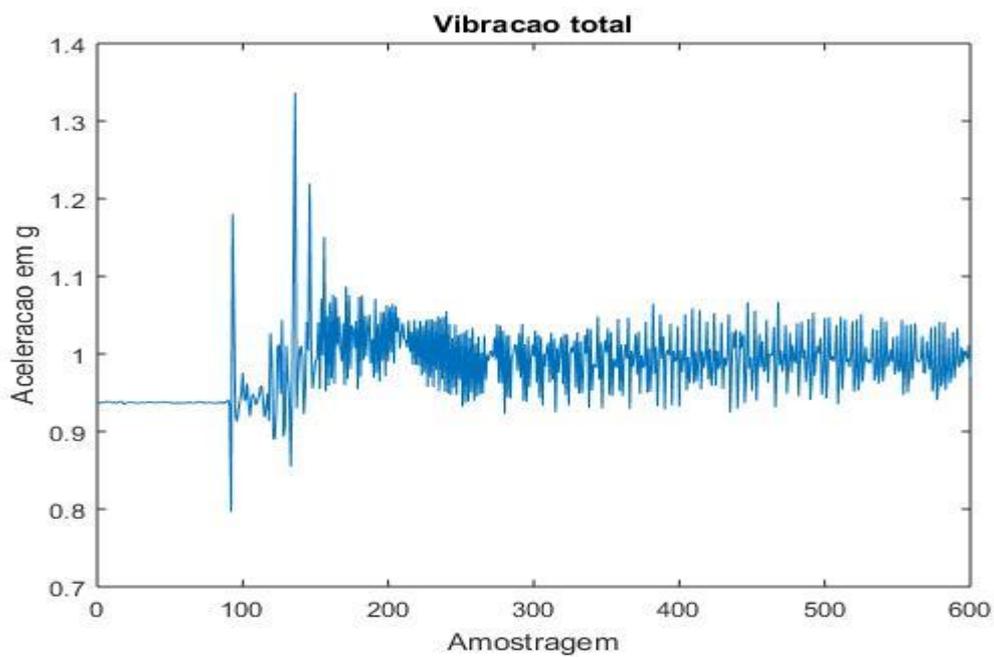
Fonte: Autor,2016.

Gráfico 26 - Relação entre a aceleração e a frequência de amostragem no sistema nos 3 Eixos do sistema motor-coxim-bancada.



Fonte: Autor,2016.

Gráfico 27 - Vibração total existente no sistema do motor utilizando os coxins como apoio.



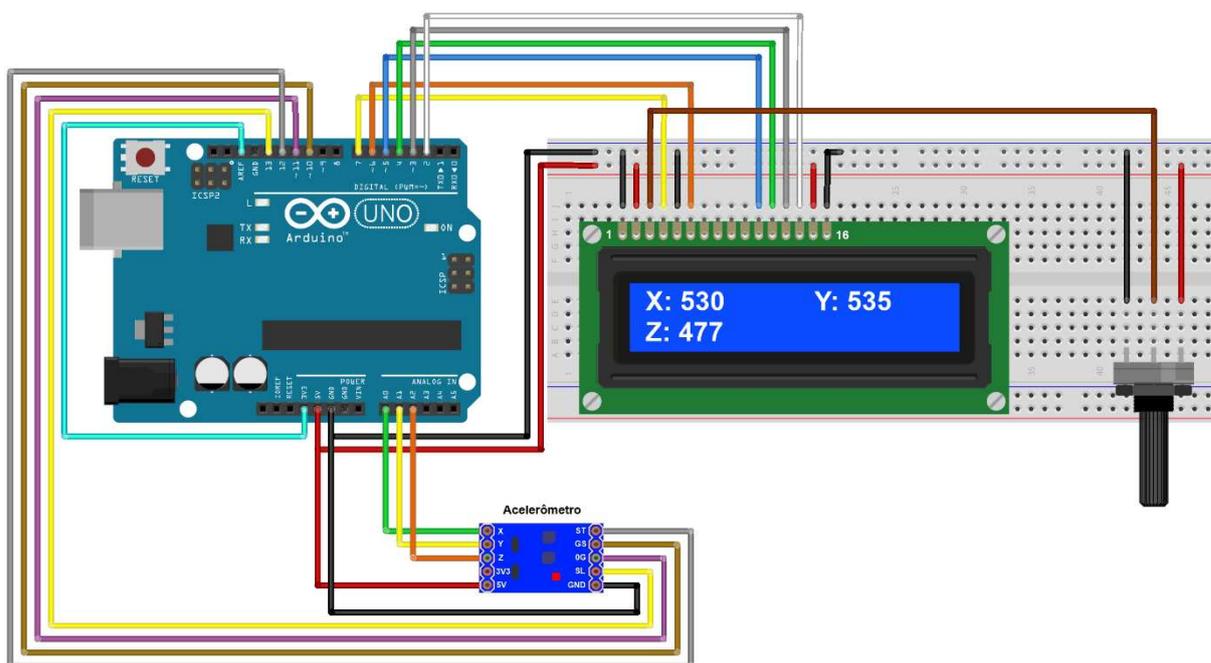
Fonte: Autor,2016.

10.1.4 Circuito acelerômetro e Arduino.

Através da Figuras 28, é possível observar a ligação eletrônica de todo sistema de medição de vibração, utilizando um acelerômetro de 3 eixos, um protoboard (responsável para comunicação entre o sensor, a placa e o display) e uma placa de Arduino. O sistema representa todas a ligações feitas nos pinos de entradas e saídas e nos pinos de alimentação, para que seja capaz de coletar os dados referentes aos eixos X, Y e Z.

Os pinos X, Y e Z do módulo são ligados às entradas analógicas. É importante o cuidado com a ligação do pino de 3.3v do Arduino ao pino **AREF**, também no Arduino. É essa ligação que fornecerá uma tensão de referência ao circuito, evitando erros na leitura dos dados. E por fim enviando dados para o display.

Figura 28 - Ligação eletrônica com display.



Fonte: Biblioteca Arduino, 2014.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a coleta dos dados (leitura das acelerações em três eixos), que foram analisados off-line. Todo o sistema, permitiu a visualização dos arquivos contendo os registros de vibração dos três eixos nas diversas formas que foram apresentadas no programa de coleta, determinando assim o eixo que ocorre maior vibração.

Como visto anteriormente no tópico 4, para cada direção do espaço onde existe as vibrações no motor tem-se uma justificativa, o nível de vibração na direção horizontal normalmente deve ser o mais alto, caso contrário se for na vertical existe um problema de fixação, analogamente se for na direção axial, estar ocorrendo desalinhamento. Com isso conseguimos os dados de cada direção, através do acelerômetro, Arduino e todo o sistema de software envolvido para programação no computador.

Este trabalho mostra-se a importância dos sensores na cadeia de medição e dos dispositivos de absorção de vibração. Cada transdutor é utilizado para um conjunto de máquinas e aplicações diferentes, com ajuda deles podemos obter os dados das vibrações mecânicas, as amplitudes, frequência, para depois poder controlá-las, isto é feito através de amortecedores de massa ativa ou absorvedores dinâmicos de vibrações. Conforme os dados obtidos e ilustrados no gráfico 27, pode se observar que o motor possui maior faixa de vibrações no eixo vertical do motor, ou seja, significa que geralmente existe um problema de fixação, e em alguns instantes no eixo Axial, ou seja, também existindo problema desalinhamento.

Por fim, o sistema permitiu diagnosticar erros no sistema de apoio do motor, se tornando um meio de manutenção corretiva para máquinas e motores. A solução para o problema seria a troca por novos coxins ou a introdução de um ADV no sistema de apoio do motor. Fazendo com que o motor tenha uma vibração dentro dos padrões, e devidamente com uma maior vibração no eixo horizontal.

12. RECOMENDAÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível aprender um pouco sobre essa vasta linha de pesquisa. O controle das vibrações é de extrema importância não só para a engenharia mecânica, mas para todas as engenharias de mobilidades. A partir desse trabalho foi possível construir algumas ideias sobre os futuros trabalhos que podem ser aplicados para dar continuidade ao trabalho. Como por exemplo:

- Aplicação da placa ZigBee ou Xbee para monitoramento e análise da vibração.
- Construir uma análise vibratória usando a Transformada de Fourier das máquinas (motores e bombas).
- Analisar as vibrações não apenas de um, mas de vários motores utilizando o ZigBee ou Xbee.
- Adicionar absorvedores dinâmicos de vibração (ADV) para atenuar as vibrações

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. T. e GÓZ, R. D., Curso de Balanceamento de Rotores, Itajubá, MG: FUPAI, 1993.
- ALVARO JUSTEN. Curso de Arduino: Apostila 1, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2014, 36p.
- BALACHANDRAN, Balakumar; MARGRAB, Edward B. Vibrações mecânicas. São Paulo: CENGAGE Learning, 2011. xix, 616 p. ISBN 9788522109050.
- CUNHA JR., S.S., 1999, "Estudo Teórico e Numérico de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- DIMAROGONAS, A. D. and HADDAD, S., Vibration for Engineers, New Jersey: Prentice- Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1992.
- EHRICK, F. E., Handbook of Rotor Dynamics, New York: Mc. Graw Hill, 1993.
- FRAHM, H., 1911, Neuartige Schlingertanks zur Abdämpfung von Schiffsrollbewegungen und ihre erfolgreiche Anwendung in der Praxis, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 12-1911, pp 283.
- HARTOG, J. P. D., 1972, Vibrações nos Sistemas, Editora da Universidade de São Paulo / Editora Edgard Blucher, São Paulo, Brasil.
- HARVEY, James A. Smart Materials. In: Kutz, M. Handbook of Materials Selection, Ed. John Wiley & Sons, E.U:A, 2002
- INMAN, D. J., Engineering Vibration, 3th ed., New Jersey: Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, 2008.
- J. M. HUGHES, Arduino: A Technical Reference: A Handbook for Technicians, Engineers, and Makers. "O'Reilly Media, Inc.", 2016, 638p.
- KATSUHIKO, Ogata, Solução de Problemas de Engenharia de Controle com MATLAB. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1997, 330p.
- MATSUMOTO, E. Y. MATLAB 7: Fundamentos. São Paulo: Editora Érica, 2004.
- MCROBERTS MIKE, Beginning Arduino. Apress 2013, 424p;
- PREUMONT, A. Vibration control of active structures: an introduction. 2ª ed. Norweel, Ma – EUA: Luwer Academic, 2002.
- RAO, S. S., 1995, Mechanical Vibrations, Editora Addison Wesley, 3ª Edition, Massachussets, USA.
- RIPPER NETO, A. P., Vibrações Mecânicas. 1ed. Rio de Janeiro, E-papers, 2007.
- RIVIN, E. I. Passive engine mounts: some directions for further development. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, Detroit, Michigan, 1985. Papers. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1985. (SAE paper, 850481).
- SCHMITT R.V.; LEIGANG C. J. Design of elastomeric vibration isolation mounting system for internal combustion engines. In: ANNUAL EARTHMOVING

INDUSTRY CONFERENCE, 27., Peoria, Illinois, 1976. Papers. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1976. (SAE paper, 760431).

SEQUEIRA, Cláudia D.(2005) “A Análise de Vibrações como Ferramenta no Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas”. Lisboa : Tese de Mestrado – FCT;

SOEIRO, N. S., Notas de Aula de Vibrações Mecânicas. Belém, PA: UFPA-ITEC-FEM, 2007.

SOTELO JR., José; FRANÇA, Luís Novaes Ferreira. Introdução às vibrações mecânicas. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006. 168 p. ISBN 85-212-0338-1.

SUN, J. Q., JOLLY, M. R. e NORRIS, M. A., 1995, "Passive, Adaptive and Active Tuned Vibration Absorbers - A Survey ", Transactions of the ASME, Vol. 117, pp. 234-242.

TAYLOR, James I. (2000): “The Vibration Analysis Handbook”. First Edition, Vibration Consultants, inc;Coimbra, A.L., 1978, “Lessons of Continuum Mechanics”, Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brazil, 428 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC. Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores. Bélém, PA, 2008.

WANDERSON RICARDO, mini curso de Arduino, Rio Grande do Norte, 2015, 52p.

YU Y.; NAGANATHAN N. G.; DUKKIPATI R. V. A literature review of automotive vehicle engine mounting systems. v.36, n.1, p. 123-142, jan. 2001.

APÊNDICE A- ALGORITMO UTILIZADO PARA COLETAR OS DADOS DO SENSOR.

```
//Programa : Teste Acelerometro MMA7361
//Botão interativo para inicio do programa

#include <AcceleroMMA7361.h> //Carrega a biblioteca do MMA7361

int button =9;
int ledgreen =6;
int ledred=5;
//int janela=3000;
AcceleroMMA7361 accelero;
int tempo=0;
int pausa=1;
int t;
int x;
int y;
int z;
unsigned long tempo_de_espera;
int estado;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  accelero.begin(13, 12, 11, 10, A0, A1, A2);
  //Seta a voltagem de referencia AREF como 3.3V
  accelero.setAREfVoltage(3.3);
  //Seta a sensibilidade (Pino GS) para +/-6G
  accelero.setSensitivity(LOW);
  accelero.calibrate();
  pinMode(button,INPUT);
  pinMode(ledgreen,OUTPUT);
  pinMode(ledred,OUTPUT);
  estado = LOW;
}
```

```
void loop()
{
    estado = digitalRead(button);
    if(((estado == HIGH || tempo > 0))&&( tempo <= 1000)){
        digitalWrite(ledred,HIGH);
        digitalWrite(ledgreen,LOW);
        x = accelero.getXAccel(); //Obtem o valor do eixo X
        y = accelero.getYAccel(); //Obtem o valor do eixo Y
        z = accelero.getZAccel(); //Obtem o valor do eixo Z
        //Serial.print("x: "); //Mostra os valores no serial monitor
        Serial.print(x);
        Serial.print(" \t ");
        //Serial.print(y);
        //Serial.print(" \tz: ");
        //Serial.print(z);
        //Serial.print("\tG*10^-2");
        delay(pausa);
        //Serial.print("\Tempo:");
        //Serial.print(tempo);
        tempo = tempo + pausa;
    }
}
```