



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS DANTAS FRANCO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS
DE ENGRENAGENS E ROLAMENTOS.**

Fortaleza-CE

2016

LUCAS DANTAS FRANCO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS
DE ENGRENAGENS E ROLAMENTOS COM FALHAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho Final de Curso do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará – UFC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra

Fortaleza-CE

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F895d Franco, Lucas Dantas.

Desenvolvimento de uma bancada didática para aquisição de sinais de engrenagem e rolamentos / Lucas Dantas Franco. – 2016.

33 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra.

1. Bancada. 2. Engrenagens. 3. Rolamentos. 4. Análise de sinais. 5. Vibração. I. Título.

CDD 620.1

Lucas Dantas Franco

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS
DE ENGRENAGENS E ROLAMENTOS COM FALHAS.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel(a) em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 07 de Julho de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Pierre Maurice Christophe Lamary – Universidade Federal do Ceará

Francisco Elicivaldo Lima – Universidade Federal do Ceará

Roberto de Araújo Bezerra – Universidade Federal do Ceará

“Porquanto o que de Deus se pode conhecer neles se manifesta, porque Deus lho manifestou.

Porque as suas coisas invisíveis, desde a criação do mundo, tanto o seu eterno poder, como a sua divindade, se entendem, e claramente se vêem pelas coisas que estão criadas, para que eles fiquem inescusáveis;”
Romanos 1:19,20

“Os céus declaram a glória de Deus e o firmamento anuncia a obra das suas mãos.”

Salmos 19:1

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus, em primeiro lugar, que tudo criou e por meio de quem toda a beleza da ciência permeia;

A minha futura esposa, Ramona Cristina, que me entendeu e me deu todo o suporte;

A minha família que me deu apoio, em especial minha irmã Larissa Dantas;

Aos amigos mais chegados que irmãos que me foram de extrema importância durante todo o curso, em destaque Adna, Samuel, Diego, Caio e Carlos e todos os mais que compõem a Igreja Batista de Montese;

Aos meus queridos irmãos do Vidas Para Cristo: Emanuel, Kim, Yan, Ju, Amanda, Bruno, Débora, Thainá e Davi por terem sido enviados de Deus para fazerem do ambiente universitário um lugar melhor;

Aos colegas do Laboratório de Vibrações Hiago e Handerson que foram fundamentais nesse trabalho;

Ao Bonfim, da oficina mecânica que prestou seus serviços com muito esmero;

Ao Prof. Dr. Roberto de Araújo Bezerra que possibilitou esse projeto;

A UFC por dar condições de estudo.

RESUMO

FRANCO, Lucas Dantas. **Desenvolvimento de uma bancada didática para aquisição de sinais de engrenagens e rolamentos**. 2016. Xf. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2016.

O uso de elementos de máquinas rotativos tem aplicações incontáveis na indústria pós-moderna. Desde a caixa de marcha de automóveis utilizados diariamente para o transporte de milhões de pessoas no mundo até o rolamento da turbina na produção de energia hidrelétrica, a preocupação com a manutenção destes é motivo de substancial investimento para uma prolongada vida útil do equipamento. Este trabalho tem como objetivo a construção de uma bancada para a aquisição de sinais em elementos rotativos (engrenagens e rolamentos) para a aplicação de técnicas de análise dos sinais vibratórios para detecção de falhas.

Palavras-chave: Bancada, Engrenagens, Rolamentos, Análise de sinais, Vibração.

ABSTRACT

FRANCO, Lucas Dantas. **Desenvolvimento de uma bancada didática para aquisição de sinais de engrenagens e rolamentos com falhas.** 2016. Xf. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza, 2016.

The use of rotating elements has uncountable applications on post-modern industry. From gear boxes, used daily for the transport of millions around the world, to turbine bearings in electrical power production, the concern with maintaining these elements is a substantial reason of investment for a long equipment life. This work aims to analyze rotating components (gears and bearings) for the application of acquisition of vibration signals techniques for fault detection.

Key Words: Bench, Gears, Bearings, Signal Analysis, Vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Desenho Prévio	14
Figura 2 - Desenho Prévio em Perspectiva	14
Figura 3 - Exemplo de engrenagens utilizadas	15
Figura 4 - Pinhões	16
Figura 5- Flange para acoplar na engrenagem.....	16
Figura 6 – Mesa - detalhe dos rasgos para movimentação dos mancais.....	17
Figura 7 Desenho final da bancada	18
Figura 8 - Esquema de montagem da bancada	18
Figura 9 - Acelerômetro B&K.....	19
Figura 10 - Condicionador de sinais	20
Figura 11 - Osciloscópio.....	21
Figura 12- Código do software de tratamento computacional	21
Figura 13 - Montagem da Bancada.....	23
Figura 14 - Demonstração de erro a ser corrigido em sinal lido.....	24
Figura 15 - Erro de “.txt” corrigido.....	24
Figura 16 - Vista superior da bancada.....	25
Figura 17 - Bancada em funcionamento	26
Figura 18 - Disposições de engrenamentos disponíveis na bancada	27
Figura 19 - Acoplamento sugerido 1	27
Figura 20 - Acoplamento sugerido escolhido.....	28
Figura 21 - Aplicação de técnicas preditivas	29
Figura 22 - Sintoma X Problema em engrenagens	30
Figura 23 - Frequências X Equações em Rolamentos	30

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Motivação.....	10
1.2 Objetivo.....	11
2. REVISÃO LITERÁRIA	11
2.1 Manutenção.....	11
2.2 Vibração.....	11
2.3 Transformada de Fourier.....	12
2.4 Aquisição de Sinais Vibratórios.....	12
3. DESENVOLVIMENTO DA BANCADA	13
3.1 Desenho prévio.....	13
3.2 Melhorias no desenho.....	14
3.2.1 Grupo de engrenagens.....	15
3.1.2 Flange da engrenagem movida.....	16
3.1.3 Mesa com rasgos.....	17
4. BANCADA	18
4.1 Componentes da bancada.....	18
4.1.1 Acelerômetro.....	19
4.1.2 Condicionador de sinais.....	20
4.1.3 Osciloscópio.....	20
4.1.4 Tratamento do sinal.....	21
4.2 Montagem da bancada.....	22
4.3 O sinal recebido.....	23
5. TESTE DE BANCADA	25
6. MELHORIAS E ADAPTAÇÕES	26
7. APLICAÇÃO PRÁTICA	28
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
8.1 Sobre a bancada.....	31
8.2 Projeções.....	31
9.REFERENCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Diante da competitividade vivida atualmente, a diminuição dos custos de produção tem ocasionado um investimento elevado na busca por técnicas e tecnologias que possam proporcioná-lo. Cada vez mais se tem apostado em uma produção rápida, mas sem perder a qualidade. Desde o tempo pós-Segunda Guerra Mundial, as indústrias investem na qualidade de seus produtos para que atinjam as expectativas e as funcionalidades esperadas.

Culturas envolvendo a qualidade, como o 6SIGMA, que investe para ter uma variabilidade mínima nos produtos da linha produtiva, têm feito com que a competitividade entre as grandes e pequenas indústrias apontem um ramo significativo de seus investimentos em uma manutenção dessa qualidade. No aspecto da qualidade, uma máquina vai perdendo sua precisão ao passar do tempo, por causa do desgaste e outras intempéries, o que faz com que uma manutenção adequada garanta que as características da máquina sejam garantidas por um período maior.

Máquinas com elementos rotativos, por o terem exposto a tensões alternadas, são dispostas a falharem com maior frequência. Para uma maior vida útil de um equipamento deste tipo, algumas tendências de manutenção foram sendo desenvolvidas com o tempo. A manutenção preditiva ganhou espaço ao se mostrar extremamente eficiente e aconselhável para equipamentos caros, evitando assim o desperdício de certa peça ainda própria para o uso que seria substituído por um elemento novo assim que certo prazo estatístico de validade fosse vencido.

Dentro da Manutenção Preditiva, a Análise de Vibrações é uma ferramenta utilizada, dentre outros, para a análise de falhas em engrenagens e rolamentos. Este trabalho descreve a construção de uma bancada de testes para aquisição de sinais em sistemas rotativos (engrenagens e rolamentos) para fins tanto didáticos, quanto de estudo de técnicas de análise desses sinais.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o projeto e a construção de uma bancada para aquisição de sinais de vibração para detecção de falhas em engrenagens e rolamentos. A bancada ainda tem a possibilidade para aplicação de conhecimentos em vibrações e aquisição e tratamento de sinais, a serem desenvolvidos durante o curso de Engenharia Mecânica através das disciplinas de Dinâmica das Máquinas, Vibrações e Análise de Sinais.

2. REVISÃO LITERÁRIA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos utilizados para a elaboração da bancada, visando à melhor compreensão de todos os testes a serem analisados

2.1 Manutenção

A manutenção antes fora vista como um mal necessário, onde certo setor da indústria consumia insumos que poderiam ser de impacto financeiro significativo. Com o passar dos anos e o estudo aprofundado, bem como a conscientização dos profissionais e gestores, a manutenção ganhou um novo papel, sendo então entendida como o setor capaz de aumentar a vida longa de determinado bem, gerando corte de possíveis gastos futuros, com os corretos cuidados que cada equipamento deveria ter.

Segundo a NBR 5462/1994, Manutenção Preditiva é a “Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

A manutenção preditiva, portanto, se mostra uma ferramenta que merece bom investimento, por seu retorno em qualidade e prevenção de custos elevados causados por defeitos e falhas em máquinas de grande importância na linha de produção.

2.2 Vibração

Segundo a NBR 7497/1982, a vibração é a “Variação no tempo do valor de uma grandeza a qual descreve o movimento ou posição de um sistema mecânico, quando o valor é alternadamente maior ou menor do que certo valor médio ou de referência.” e uma

vibração periódica é a “Vibração cujo valor se repete em certos incrementos iguais da variável independente.”

Portanto, movimentos periódicos podem ser analisados através de uma função do tipo:

$$Y = f(\tau\pi + t) \quad (1)$$

2.3 Transformada de Fourier

A Teoria de Fourier afirma que qualquer sinal em um domínio do tempo pode ser representado por uma soma de senos e cossenos, desde que o sinal seja contínuo e periódico. A Transformada de Fourier permite, então, descrever esse sinal em um novo espectro, o espectro da frequência. Na forma:

$$F(\mathcal{E}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * e^{-2\pi i \mathcal{E} t} \quad (2)$$

A Transformada Rápida de Fourier é um algoritmo desenvolvido pela contribuição de vários autores como Gauss, Danielson, Lanczos, Cooley e Turkey, para uma forma adequada no tratamento de um sinal onde a Transformada Direta de Fourier (Uma forma truncada da Transformada de Fourier) é calculada computacionalmente.

2.4 Aquisição de Sinais Vibratórios

A aquisição de perturbações mecânicas em qualquer sistema mecânico, para serem tratadas computacionalmente, necessita ser transformada de energia mecânica para alguma espécie de pulso eletrônico e assim ser lida de forma adequada por um computador. Segundo a NBR 7497/1982, um transdutor é um “Dispositivo para receber energia de um sistema e fornecer energia, da mesma ou diferente espécie, a outro sistema, de tal maneira que a determinada característica da entrada apareça na saída”

Os principais tipos de transdutores em vibrações e choques são:

- a) acelerômetro piezelétrico;
- b) acelerômetro piezo resistivo;
- c) acelerômetro com extensômetros elétricos;
- d) transdutores de resistência elétrica variável;

- e) transdutores eletroestáticos (capacitivo);
- f) extensômetro de lâmina;
- g) transdutor de magnetoestricção;
- h) transdutor de relutância variável;
- i) transdutor de bobina móvel;
- k) transdutores de indução;
- l) transdutor eletrônico.

O Transdutor fará a leitura das perturbações mecânicas e a enviará a um sistema de condicionamento desse sinal. Esse condicionamento deverá fazer uma amplificação do mesmo e filtrá-lo para uma faixa de frequência útil.

Para efeitos de análise, a bancada proposta terá furos roscados para o encaixo de um acelerômetro piezoelétrico B&K nas direções radiais.

3. DESENVOLVIMENTO DA BANCADA

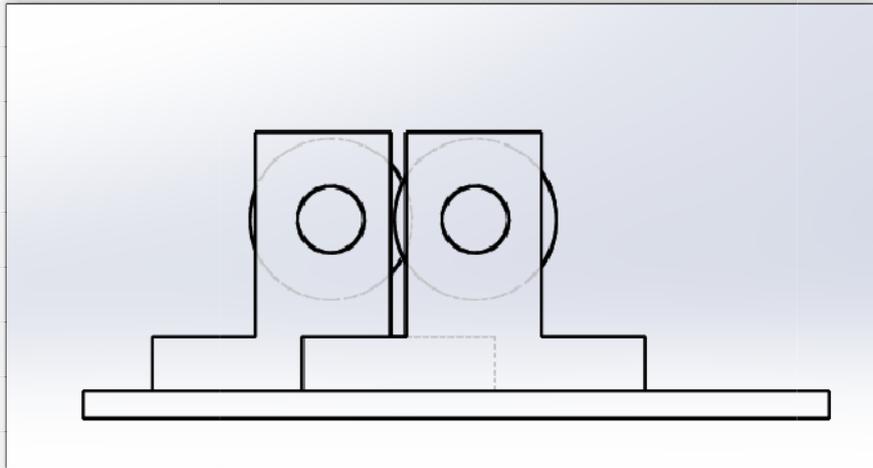
Este capítulo tratará das etapas adotadas na concepção da idéia, dos ajustes e da bancada sugerida para aquisição de sinais para aplicação das técnicas de análise de vibração para detecção de falhas em engrenagens e rolamentos.

3.1 Desenho prévio

Para os tipos de análises que se seguiriam um desenho prévio foi proposto.

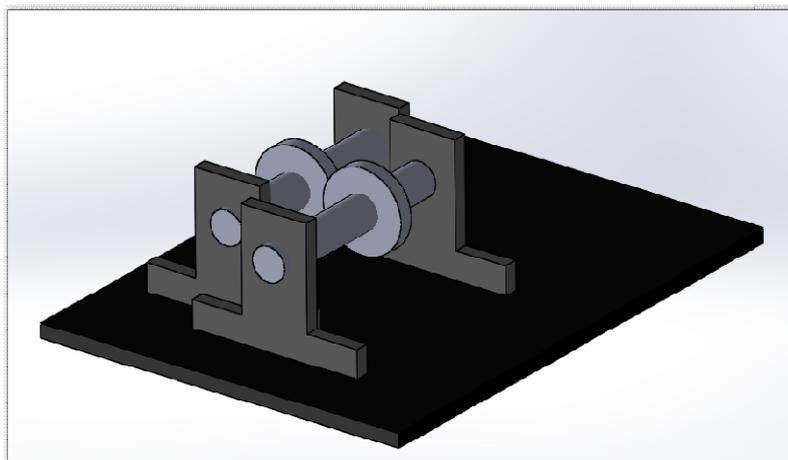
O design primário buscava uma bancada simples para a aquisição de sinais em um par de engrenagens e nos quatro rolamentos dos quatro mancais localizados:

Figura 1- Desenho Prévio



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 2 - Desenho Prévio em Perspectiva



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 Melhorias no desenho

Com a análise do que se poderia ser feito na bancada de testes, algumas modificações foram propostas:

Melhorias no sistema de engrenamento:

Com a idéia de utilizar a mesma bancada para uma maior faixa de testes foi proposto um estilo de acoplamento que beneficiasse um eixo com mais de uma engrenagem e de acoplamento relativamente simples entre elas, a melhoria proposta foi um sistema que permitisse que uma das engrenagens pudesse deslocada sobre o seu eixo, permitindo assim o acoplamento com outras engrenagens. Para a utilização

desta melhoria, engrenagens de caixa de marcha de moto foram utilizadas e uma bucha foi desenvolvida para dar movimento axial para a engrenagem movida.

3.2.1 Grupo de engrenagens

O grupo de engrenagens escolhido está demonstrado na Figura 3, onde dois pares do mesmo conjunto foram dispostos para o trabalho onde um dos pares seria propositalmente danificado e o outro par seria o padrão a ser comparado.

Figura 3 - Exemplo de engrenagens utilizadas



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4 - Pinhões



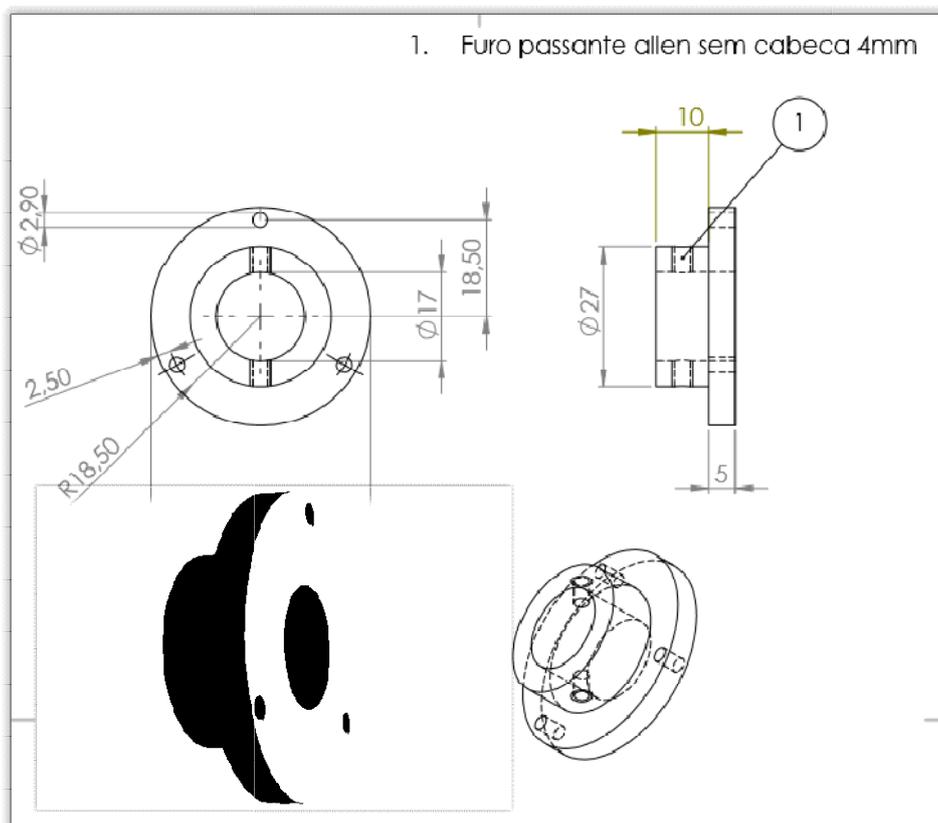
Pinhão 1 – 13 dentes
 Pinhão 2 – 20 dentes
 Pinhão 3 – 23 dentes

Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.2 Flange da engrenagem movida

O flange possibilita que a engrenagem possa deslizar sobre o eixo e ser fixada em lugar em que a análise fosse desejada.

Figura 5- Flange para acoplar na engrenagem



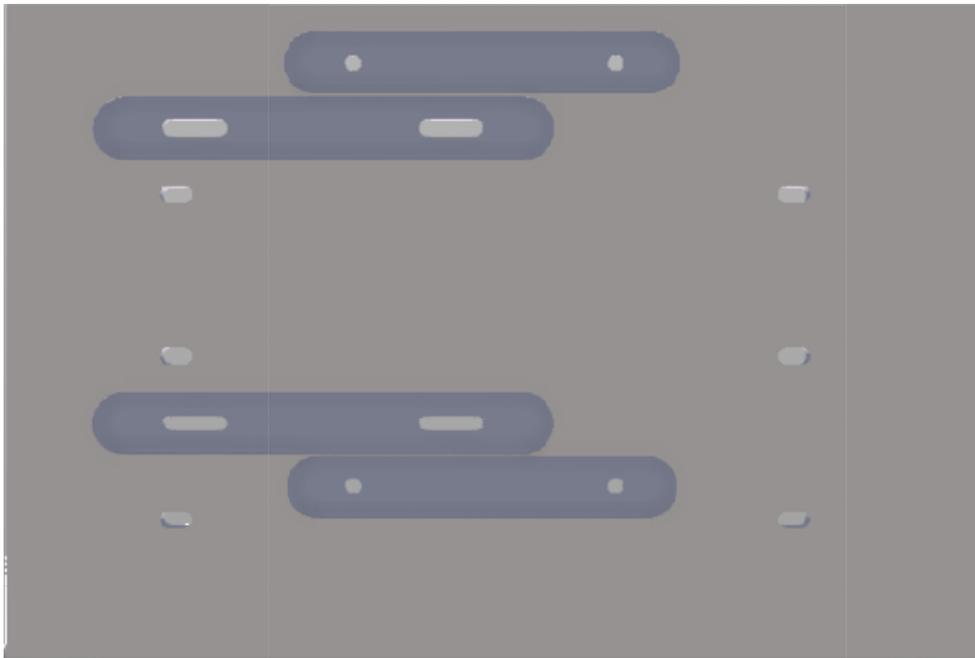
Fonte: Elaborada pelo autor

3.1.3 Mesa com rasgos

A mesa foi alterada para possibilitar movimento aos mancais.

A Figura 5 mostra o flange utilizado para acoplar a engrenagem para que ela deslize axialmente, entretanto, para um engrenamento com pinhões de diâmetros diferentes, a engrenagem movida deve mover-se transversalmente. Diante desse problema a melhoria para o engrenamento proposta foi a criação de rasgos para os mancais onde eles pudessem deslizar, permitindo, assim, o engrenamento entre os diferentes pares de engrenagens tidos para testes.

Figura 6 – Mesa - detalhe dos rasgos para movimentação dos mancais

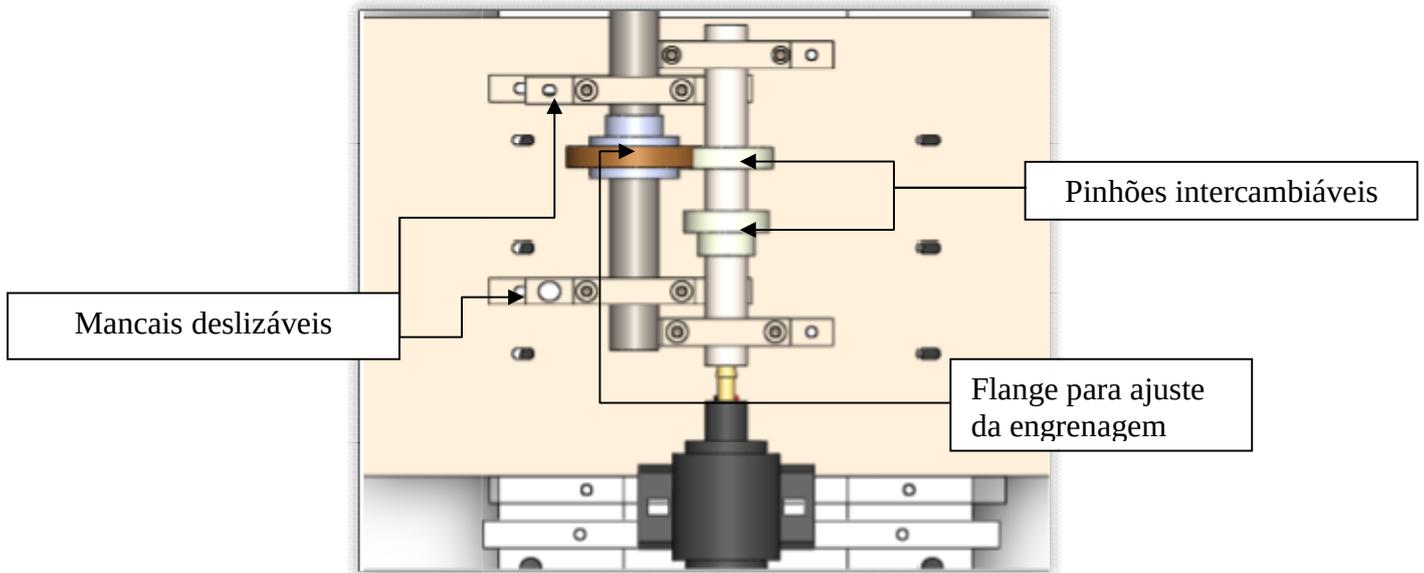


Fonte: Elaborada pelo autor

Com as melhorias propostas várias combinações de engrenamento puderam ser dispostas para análise.

O desenho final para a montagem está disposto na Figura 7:

Figura 7 Desenho final da bancada



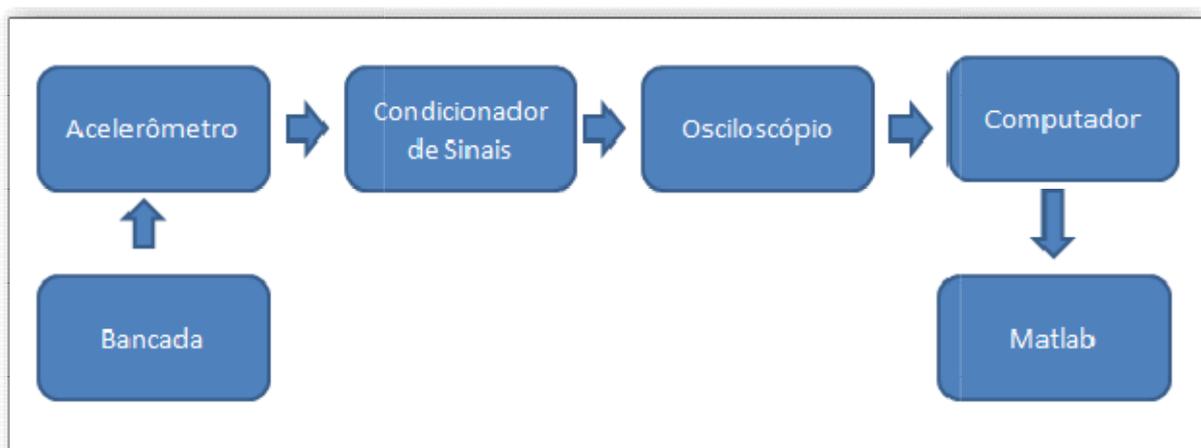
Fonte: Elaborada pelo autor

4. BANCADA

Este capítulo tratará sobre o processo de montagem da bancada, aquisição de sinais e sobre o tratamento computacional dos dados adquiridos.

4.1 Componentes da bancada

Figura 8 - Esquema de montagem da bancada



Fonte: Elaborada pelo autor

A montagem possui a distribuição apresentada pela Figura 8. Cada elemento será abordado em detalhe nos tópicos subsequentes:

4.1.1 Acelerômetro

O acelerômetro utilizado foi um acelerômetro piezoelétrico de alta confiabilidade que poderia ser parafusado em qualquer mancal na parte superior e lateral. Segundo Goldman (1999), alguns critérios devem ser observados para a correta alocação do acelerômetro.

- a) as medições de vibração foram realizadas em uma superfície rígida suficiente para que não fosse afetada pela pressão exercida pelo acelerômetro;
- b) as medições de vibração foram realizadas com o transdutor perpendicular ao eixo das engrenagens, em cima dos mancais dos eixos motor e movido;
- c) o transdutor foi firmemente parafusado aos mancais, pois essa montagem é preferível para a identificação de altas frequências, como a GMF e as suas harmônicas;

Tabela 1 - Propriedades do acelerômetro

Fabricante	Brüel & Kjaer
Modelo	4382
Sensitividade	$3.18 \frac{pC}{m^2}$
Faixa de Frequência	0,1 até 8400 Hz

Figura 9 - Acelerômetro B&K



Fonte: B&K – Product Data

4.1.2 Condicionador de sinais

O condicionador de sinais utilizados foi da mesma fabricante.

O condicionador de sinais é necessário por sua capacidade de amplificar a tensão recebida do acelerômetro, pois, é de uma ordem de grandeza menor do que a sensibilidade de outros equipamentos, como seja o osciloscópio. O condicionador de sinais foi ajustado para amplificar em 1000 (mil) vezes o sinal advindo do acelerômetro.

Figura 10 - Condicionador de sinais



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 2- Propriedades do condicionador

Fabricante	Brüel & Kjaer
Faixa de frequência para aceleração	0,2 a 100000 Hz
Saída do sinal amplificada	0,1 a 1000 vezes
Filtro passa Baixa	Possui

4.1.3 Osciloscópio

O osciloscópio é o equipamento que faz a leitura do sinal enviado pelo condicionador, e possui um mostrador t(tempo em segundos) por s(tensão). Os sinais lidos são passados para um computador, por meio de cabos USB ou SERIAL, onde serão computacionalmente tratados. O osciloscópio utilizado foi um TekTroniks TDS 1002, com capacidade de aquisição de 2500 pontos e uma largura da banda de 60MHz.

Para a leitura do osciloscópio foram utilizados softwares disponibilizados pela fabricante do osciloscópio, como o *Wavestar for Oscilloscopes*, que disponibiliza várias opções para apresentar os dados lidos como em tabelas, gráficos e comparativos.

Figura 11 - Osciloscópio



Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.4 Tratamento do sinal

Para tratar o sinal foi utilizado um programa feito em MATLAB, desenvolvido pelo autor com a ajuda de cooperadores para testes primários, bem como para a aplicação de técnicas diferentes o desenvolvimento de novos programas se faz necessário.

Figura 12- Código do software de tratamento computacional

```

1  %=====Próxima hora (o aumento de dados em sinais)=====
2  %-----Próxima hora (o aumento de dados em sinais)-----
3  %-----Próxima hora (o aumento de dados em sinais)-----
4  %-----Próxima hora (o aumento de dados em sinais)-----
5  %-----Próxima hora (o aumento de dados em sinais)-----
6  %-----Próxima hora (o aumento de dados em sinais)-----
7  %-----Próxima hora (o aumento de dados em sinais)-----
8
9
10 % Teste com uma SENOIDE conhecida
11
12 % Importando arquivos
13 clear all
14 else
15 %-----Leitura de Dados-----
16
17 dados=xlswrite('DadosSgs20102'); % Ler os dados de um arquivo .xls
18 %-----Leitura de Dados-----
19 %-----Leitura de Dados-----
20 %-----Leitura de Dados-----
21 %-----Leitura de Dados-----
22 %-----Leitura de Dados-----
23 %-----Leitura de Dados-----
24 %-----Leitura de Dados-----
25 %-----Leitura de Dados-----
26 %-----Leitura de Dados-----
27 %-----Leitura de Dados-----
28 %-----Leitura de Dados-----
29 %-----Leitura de Dados-----
30
31 plot(t,v) % Temos antes um gráfico plotando o sinal no tempo
32 %-----Leitura de Dados-----
33 %-----Leitura de Dados-----
34 %-----Leitura de Dados-----
35 %-----Leitura de Dados-----
36 %-----Leitura de Dados-----

```

Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Montagem da bancada

Um trilho (A – Figura 13) foi utilizado para unir o motor trifásico (B – Figura 13) e a bancada montada. O motor trifásico é acionado por um variador de frequência, o que possibilita a obtenção dos sinais em várias configurações de rotação do motor. O trilho possibilita a locomoção da bancada sobre o mesmo bem como a adição de um segundo motor para testes em que a bancada esteja submetida a algum tipo de torque ou ligada à outra bancada para testes complementares.

O trilho da bancada é colocado em cima de uma mesa com sistemas de amortecimento (C – Figura 13) para a diminuição da influência de ruídos no sinal advindos da mesa e de ressonâncias.

Com a bancada posicionada, o acelerômetro é então acoplado por um parafuso Allen sem cabeça com o diâmetro especificado para o acelerômetro, prendendo-o bem ao mancal que se deseja analisar. Ajustar o acelerômetro (D – Figura 13) com um parafuso bem preso permite uma leitura mais limpa do sinal (como explicado por Goldman (1999) e expresso na sessão 4.1.1).

O acelerômetro preso é então ligado ao condicionador de sinal (E – Figura 13) que é ajustado para a sensibilidade do acelerômetro, bem como os filtros e o quanto se deseja amplificar o sinal percebido. O Condicionador utilizado possui dois tipos de alimentação: pela rede elétrica e por baterias recarregáveis, a utilização das pilhas é preferível para evitar ruídos vindos do sistema de abastecimento elétrico.

Com o acelerômetro ligado ao osciloscópio (F – Figura 13) é possível ter uma prévia de como o sinal de vibração está se comportando, apesar de ser uma visualização no domínio do tempo, pode-se ser possível identificar algum erro, como, segundo Goldman (1999), a periodicidade em que um dente de uma engrenagem quebrado engrena e causa uma perturbação significativa no sinal.

Os dados do osciloscópio são então transmitidos para um computador que, através do software fornecido pelo fabricante do próprio osciloscópio, transfere os pontos para um arquivo .txt ou .xls e que serão tratados computacionalmente por algum outro software, no caso do presente trabalho um programa em MATLAB foi utilizado para o tratamento do sinal.

Figura 13 - Montagem da Bancada



Fonte: Elaborada pelo Autor.

4.3 O sinal recebido

Após a aquisição ser feita, o arquivo .txt ou .xls gerado pelo software de leitura de dados do osciloscópio necessita de um ajuste prévio antes de seguir para o tratamento em si. Alguns sinais percebidos pelo osciloscópio estão em uma ordem de grandeza menor que a maior parte dos sinais, isso geralmente ocorre quando o cristal está vibrando e sua referência está próxima do seu setpoint. Na Figura 14 é possível identificar esse erro na área demarcada, a Figura 15 demonstra como o erro pode ser corrigido para que o programa possa rodar. O erro se dá pois o programa irá fazer cálculos com variáveis do tipo *float* que são números reais (flutuantes) e o "m" se trata de uma *string* que são caracteres destinados a texto.

Figura 14 - Demonstração de erro a ser corrigido em sinal lido

-160.00	-1.1200
-159.80	-1.0400
-159.60	-0.880
-159.40	-0.880
-159.20	-0.800
-159.00	-0.560
-158.80	-0.480
-158.60	-0.240
-158.40	-0.240
-158.20	-0.240
-158.00	800.00m
-157.80	800.00m
-157.60	160.00m
-157.40	320.00m
-157.20	240.00m
-157.00	480.00m
-156.80	720.00m
-156.60	880.00m
-156.40	960.00m
-156.20	1.0400
-156.00	1.0400
-155.80	1.2800
-155.60	1.3600
-155.40	1.5200
-155.20	1.6800
-155.00	1.7600

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 15 - Erro de ".txt" corrigido

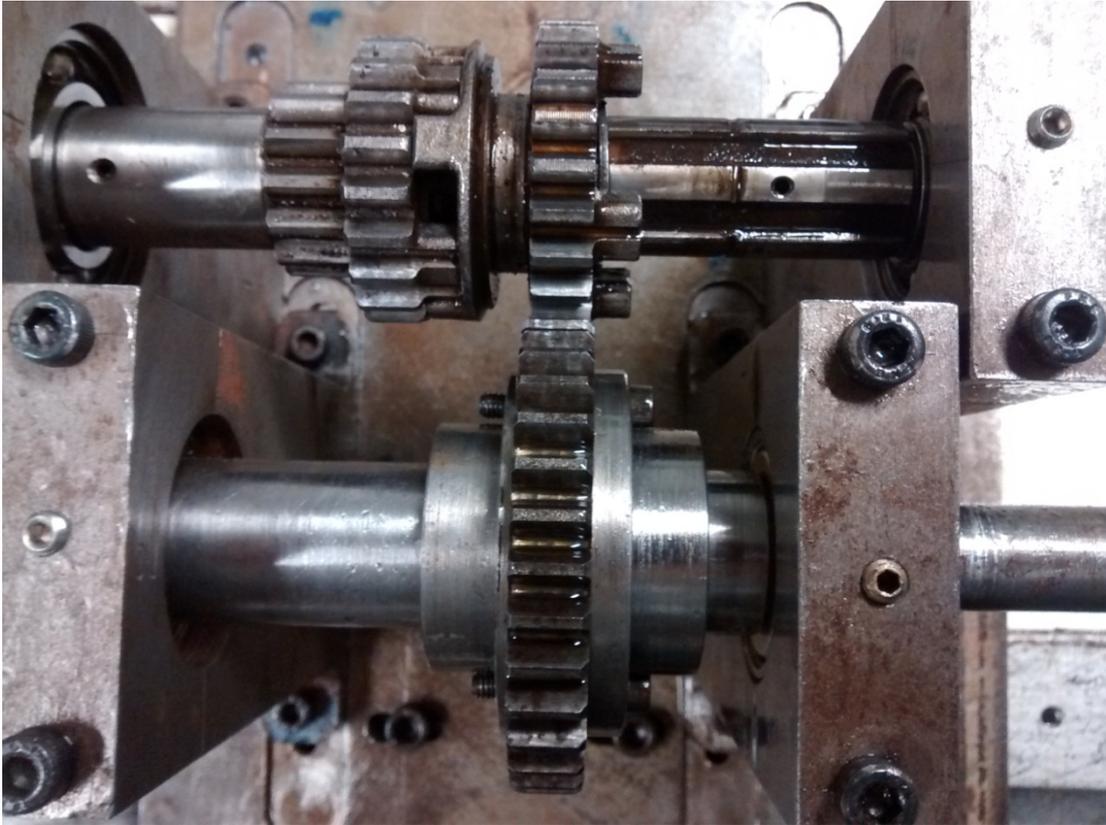
-159.40	-0.880
-159.20	-0.800
-159.00	-0.560
-158.80	-0.480
-158.60	-0.240
-158.40	-0.240
-158.20	-0.240
-158.00	0.080
-157.80	0.080
-157.60	0.160
-157.40	0.320
-157.20	0.240
-157.00	0.480
-156.80	0.720
-156.60	0.880
-156.40	0.960
-156.20	1.0400
-156.00	1.0400
-155.80	1.2800
-155.60	1.3600
-155.40	1.5200
-155.20	1.6800
-155.00	1.7600
-154.80	1.7600
-154.60	1.9200
-154.40	2.0800

Fonte: Elaborada pelo autor

5. TESTE DE BANCADA

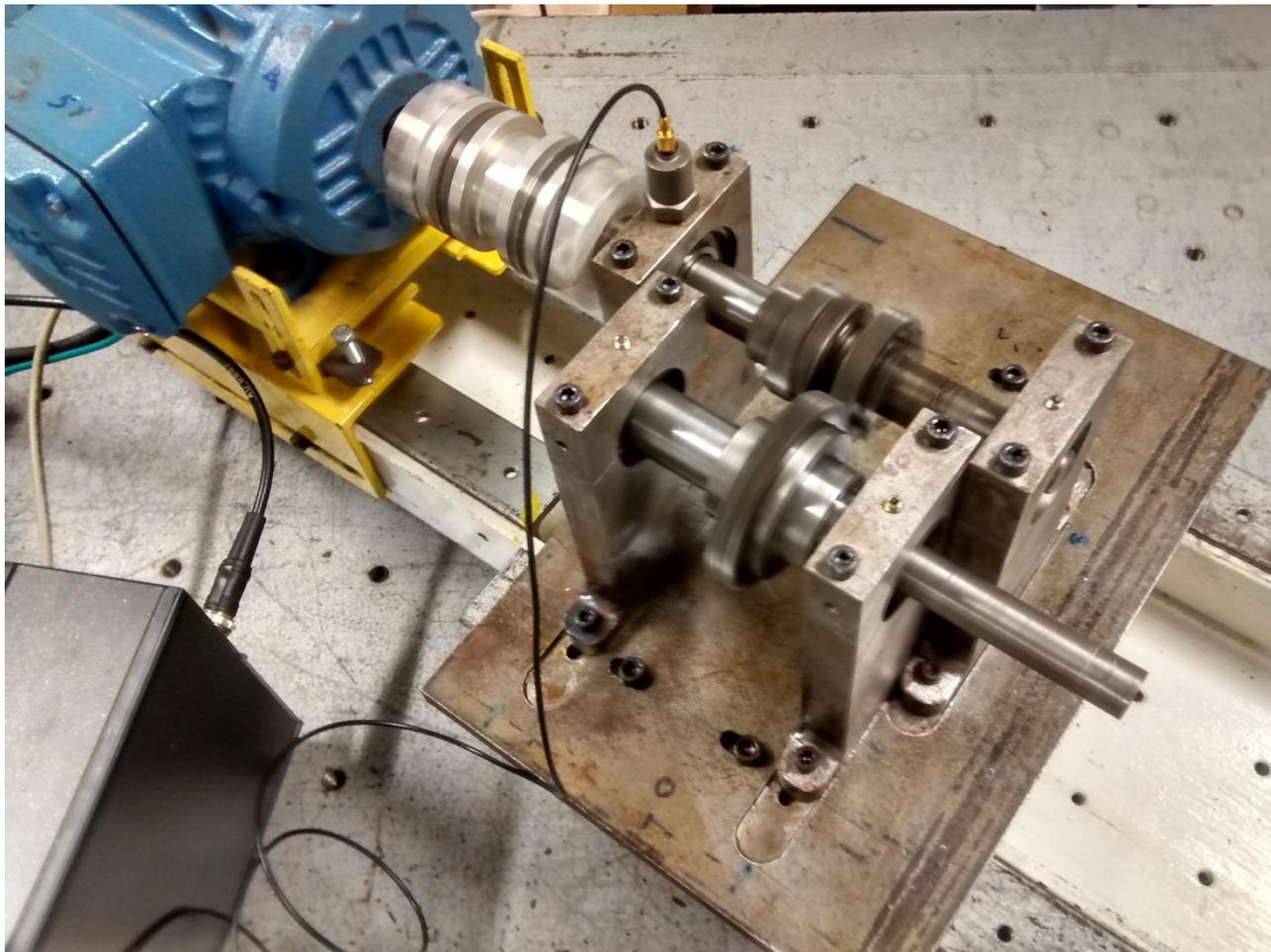
A bancada foi montada e testada e o resultado condiz com o esperado. Algumas alterações para a melhoria da bancada foram propostas e serão discutidas na próxima sessão.

Figura 16 - Vista superior da bancada



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17 - Bancada em funcionamento



Fonte: Elaborada pelo autor

6. MELHORIAS E ADAPTAÇÕES

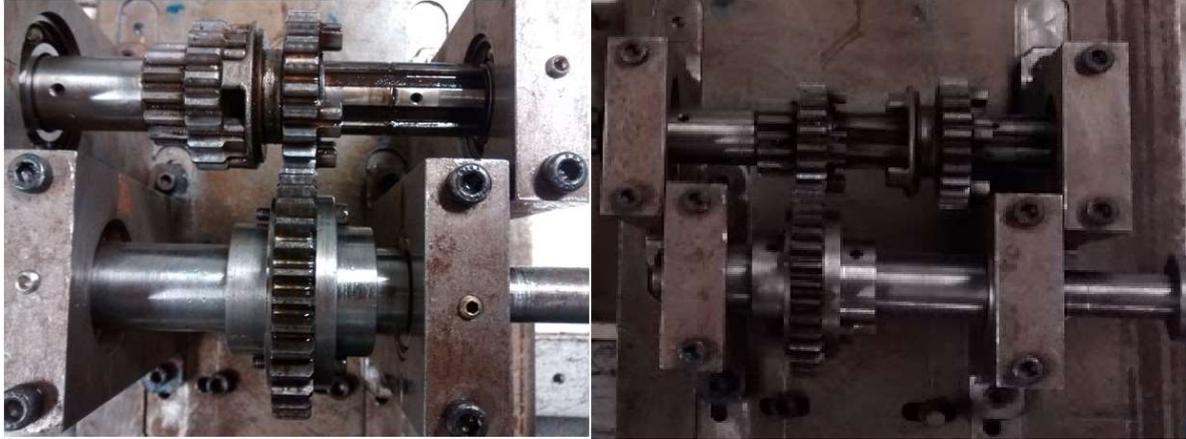
Esse capítulo dedica-se a comentar as melhorias aplicadas a bancada, não em mudança do projeto em si, mas em acessórios para que a leitura de dados fosse o quanto menor possível perturbada por fatores externos.

A primeira melhoria a ser comentada já foi exposta que é a troca da alimentação do condicionador de sinais, onde a escolha de uma alimentação por baterias recarregáveis é escolhida em vez de escolher a alimentação direta da rede de energia onde flutuações podem interferir na quantidade de ruído percebida na leitura.

Outra diferença no projeto já comentada foi o acoplamento das engrenagens que ficou comprometido devido à dificuldade de se usinar um flange tão fina quanto à de projeto, comprometendo então o acoplamento com o menor pinhão. A disposição das engrenagens no eixo original foi que contribuiu para esta dificuldade de projeto que, entretanto, foi contornada com a possibilidade de combinação com outros pares do

mesmo eixo que a bancada dispõe. As duas combinações são demonstradas em comparação na Figura 18

Figura 18 - Disposições de engrenamentos disponíveis na bancada



Fonte: Elaborada pelo autor

Uma melhoria que foi de significativa influência foi o acoplamento do eixo do motor com o eixo dos pinhões da bancada. O projeto inicial utilizava um cabo de aço, utilizado em aceleradores de fusca, para a transmissão de torque sem que as vibrações transmitidas do motor para o sistema fossem diminuídas, entretanto essa estratégia demonstrou-se ineficiente uma vez que, por qualquer desalinhamento, as vibrações seriam transmitidas para a bancada e afetariam, portanto, a leitura dos sinais que se destinassem a identificação de alguma falha específica. Um segundo acoplamento foi proposto, como se vê na Figura 19.

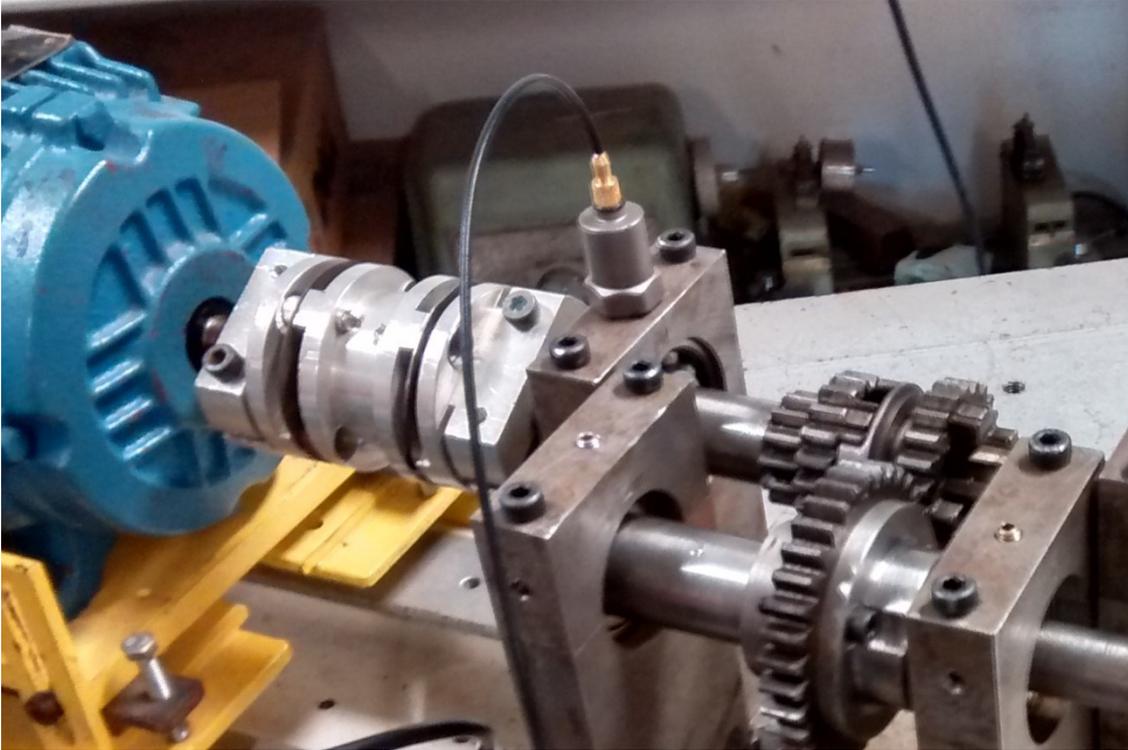
Figura 19 - Acoplamento sugerido 1



Fonte: Elaborada pelo autor

Entretanto, o acoplamento não se mostrou eficaz. Ainda havia certa vibração transmitida à bancada e então os dados poderiam ser comprometidos. Um terceiro acoplamento foi proposto, que utiliza duas molas para atenuar as vibrações.

Figura 20 - Acoplamento sugerido escolhido



Fonte: Elaborada pelo autor

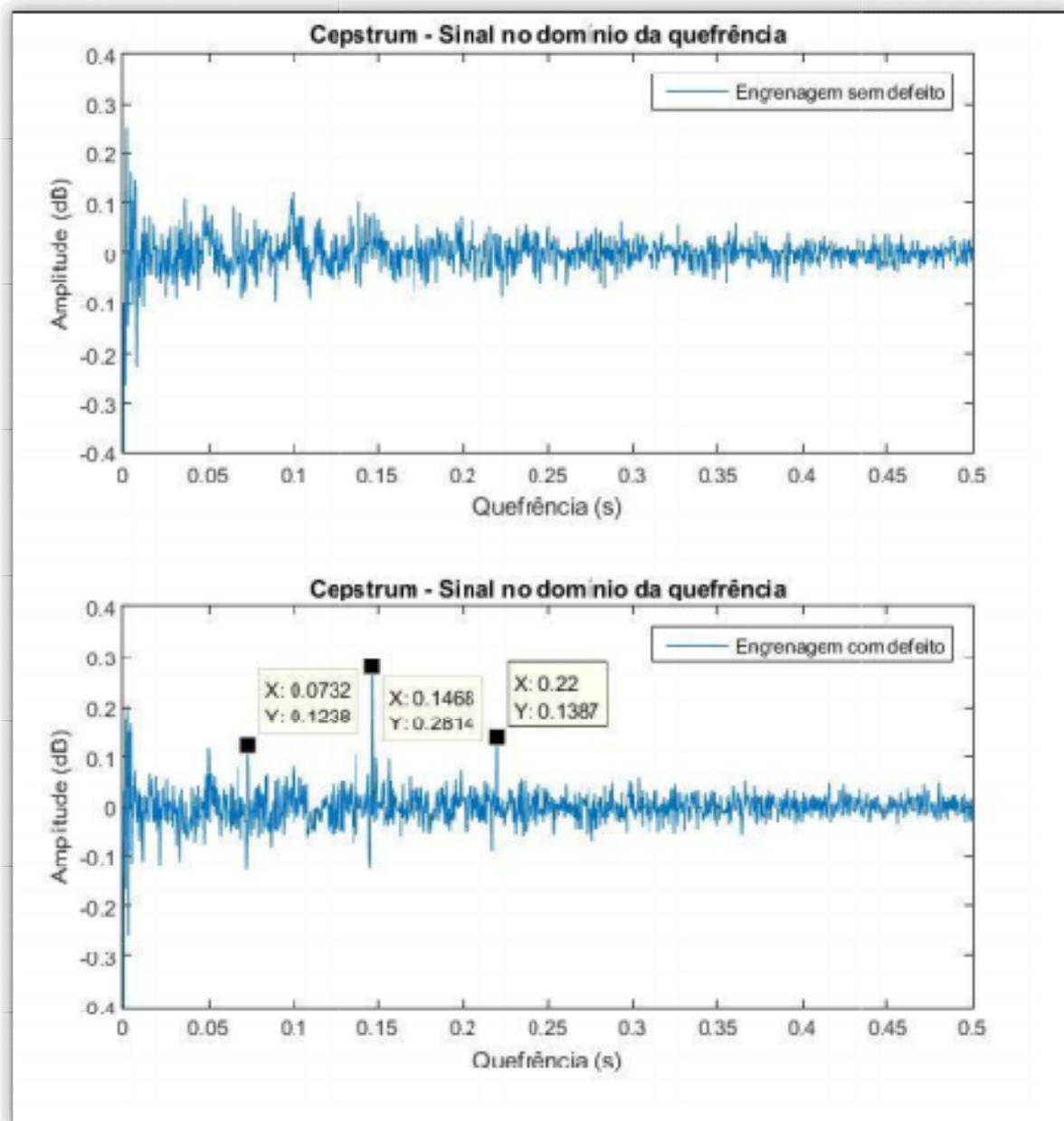
O acoplamento sugerido escolhido (Figura 20) possui uma configuração semelhante à utilizada em eixos de carros onde dois pontos diminuem a vibração do eixo, tornando assim a identificação das falhas mais evidente.

7. APLICAÇÃO PRÁTICA

Uma aplicação prática, abordada em um trabalho de conclusão de curso do curso de Engenharia Mecânica – UFC será demonstrada, de maneira breve, neste capítulo para comprovar a eficácia da bancada.

A bancada foi posta para operar sem nenhuma falha proposital para efeito de comparação. Após a aquisição dos dados da bancada em boas condições, um dos dentes da engrenagem movida foi danificado e então a bancada foi novamente montada e uma nova aquisição de dados foi feita. O resultado está disposto na Figura 21

Figura 21 - Aplicação de técnicas preditivas



Fonte: Souza, 2016

A técnica utilizada para identificação das falhas foi o *Cepstrum*, que analisa o logaritmo do espectro. E identificou alguns picos que não eram mostrados no sinal da engrenagem em bom estado.

Portanto é possível a utilização da bancada para a aplicação de diversas técnicas de manutenção preditiva pela análise da vibração além de outras aplicações quanto ao uso de lubrificantes e vida útil das engrenagens.

Outras técnicas podem ser utilizadas, como a visualização da FFT da onda, onde é possível identificar diversas falhas, como dispôs Goldman (1999)

Figura 22 - Sintoma X Problema em engrenagens

Sintoma	Problema
Alta amplitude na frequência de malha	Erro no dentado Desgaste Folga incorreta Engrenagens sobrecarregadas
Alta energia nas bandas laterais	Engrenagens excêntricas Eixos não paralelos Dente com trinca Carcaça com trinca Outras modulações (tais como acoplamentos desgastados)

Fonte: Goldman, 1999

Outro tipo de problema que pode ser analisado é a identificação de falhas em rolamentos de esferas, como mostra a Figura 23, é possível identificar cada faixa de frequência para cada tipo de erro e onde ele se localiza.

Figura 23 - Frequências X Equações em Rolamentos

Frequências	Equações
<i>Frequência da Gaiola</i>	$f_g = \frac{f_{pe}}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d} \right)$
<i>Frequência de Defeito na Pista Interna</i>	$f_{dpi} = \frac{N_e f_{pe}}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d} \right)$
<i>Frequência de Defeito na Pista Externa</i>	$f_{dpe} = \frac{N_e f_{pe}}{2} \left(1 - \frac{D \cos \beta}{d} \right)$
<i>Frequência de Defeito na Esfera</i>	$f_{de} = \frac{d f_{pe}}{2D} \left(1 + \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d^2} \right)$

Fonte: Bezerra, 2004.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Sobre a bancada

Conclui-se, pois, que a bancada é funcional e se comporta de maneira satisfatória, trazendo a possibilidade da aquisição de sinais que podem ser utilizados para a aplicação das técnicas de análise de sinais vibratórios, tema que não possui muitos profissionais especializados no mercado brasileiro, criando assim um ambiente de aperfeiçoamento das técnicas bem como a elaborações de diversos artigos que tratem do tema.

O desenvolvimento do trabalho contou com diversas frentes, desde o planejamento prático de atividades, onde a bancada tinha de ser revisada a cada novo passo que se dava sempre pensando nas possibilidades que ela poderia oferecer e as funcionalidades que poderia ter noções de fabricação e manufatura, onde impossibilidades do projeto puderam ser contornadas, escolha de materiais adequados, em questões de durabilidade e custos, e programação baseada em MATLAB.

A bancada também traz uma utilidade direta para o Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará – UFC, onde oferece uma oportunidade didática da aplicação dos conhecimentos adquiridos na cadeira de Dinâmica das Máquinas. A bancada está disponível no Laboratório de Vibrações (UFC) onde pode ser explorada em sua totalidade de função.

8.2 Projeções

Algumas melhorias podem ser ainda aplicadas à bancada. Houve a tentativa de acoplar um freio no eixo de saída da bancada, entretanto o primeiro freio produzia demasiado atrito entre o eixo e o freio, o que dilatava o eixo e poderia danificar o rolamento. Um segundo freio foi proposto, assemelhando-se ao freio de uma bicicleta, porém o sistema travava frequentemente e então foi descartado. Uma possível melhoria seria a construção de um freio magnético onde engrenamentos com torque poderiam ser testados.

Outra melhoria possível seria a criação de um software que fizesse a limpeza dos dados em .txt adquiridos, uma vez que a mudança das casas decimais de maneira manual demanda tempo que, se multiplicado por uma grande variedade de sinais adquiridos, pode tornar-se impraticável em algum projeto.

A aplicação de estudos em diferentes tipos de óleos de lubrificação é possível com esta bancada, entretanto seria mais vantajosa a construção de um sistema de realimentação de óleo para o engrenamento de maneira automática, possibilitando que o óleo que uma vez passou pelo engrenamento entre no sistema e retorne para lubrificar

novamente as engrenagens.

A construção de outro trilho que pudesse por si suportar a vibração, não necessitando de uma mesa com sistemas de atenuação de vibrações poderia possibilitar a mobilidade para salas de aula e utilização didática.

A adaptação da bancada para uma mais fácil remoção e manejo seria de importância caso fosse necessário em um mesmo estudo a movimentação da mesma sobre o trilho, o que leva a sugestão de uma adaptação para o acoplamento da bancada com o trilho.

9. REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR5462: Rio de Janeiro 1982, 35p.

GOLDMAN, Steve. **Vibration spectrum analysis: a practical approach**. 2 nd ed.

West Nyack, NY 10994: Industrial Press Inc., 1999. 331 p.

MELO, Kauã Monteiro. **Aquisição de sinais de vibração através de acelerômetro mems e interface de sistemas embarcados Raspberry Pi**. /Kauã Monteiro Melo. – 2016. 77 f. : il.

BEZERRA, Roberto de Araújo – **Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração** / Roberto de Araújo Bezerra .--Campinas, SP: [s.n.], 2004

SOUZA, Nícolas Mariano Pereira de. **Comparação das análises espectral e cepstral na detecção de falha induzida em engrenagem por sinais vibratórios**. / Nícolas Mariano Pereira de Souza. – 2016. 70 f. : il.; color.

PIEZOELETRIC charge accelerometer , top connector, incl. Cable. – Disponível em : <<http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4382>> Acesso em: 01/04/2016 às 07h 04min.