

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS GUARAPUAVA
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

ROBERTO GARDIM

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA DE ANÁLISE DE
VIBRAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GUARAPUAVA
2018**

ROBERTO GARDIM

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA DE ANÁLISE DE
VIBRAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
como requisito parcial à obtenção do título de
Tecnólogo em Manutenção Industrial, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Viviane Teleginski Mazur

GUARAPUAVA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

por

ROBERTO GARDIM

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 10 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Viviane Teleginski Mazur
Prof.(a) Orientador(a)

Henrique Ajuz Holzmann
Membro titular

Ricardo Vinicius Bibna Biscaia
Membro titular

Henrique Ajuz Holzmann
Coordenador do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz
Gardim e Zulmira Paganini Gardim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha orientadora Prof. Dr. Viviane Teleginski Mazur, pelos incentivos, pela confiança e pela sabedoria com que me orientou para que o desenvolvimento do TCC alcançasse os objetivos esperados.

Agradeço também aos demais professores, os quais de alguma forma contribuíram com repasse de seus conhecimentos.

Agradecemos o suporte financeiro advindo do Edital 01/2018 PROGRAD/PROREC - Apoio ao TCC.

Enfim, a todos os colegas que estiveram comigo ao longo do curso.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser... Mas Graças a Deus, não somos o que éramos.”

(Martin Luther King Jr.)

RESUMO

GARDIM, Roberto. Bancada Didática de Análise de Vibrações. 2018. 42 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso Tecnologia em Manutenção Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

Vibrações em máquinas rotativas ocorrem de diversas maneiras e com frequência variada, dependendo do fator de causa a qual estão submetidas, o que acaba ocasionando fadiga e posterior quebra de seus componentes. O desbalanceamento, assim como o desalinhamento, são fatores determinantes para que essas falhas ocorram. Desta forma, se faz necessário o acompanhamento periódico e sistemático das máquinas, evitando assim, paradas inesperadas. O conhecimento prático, agregado ao conhecimento teórico, proporciona uma visão mais ampla para a determinação das causas e possíveis soluções. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma bancada didática para análise de vibrações, onde diversas situações simuladas de desbalanceamento e desalinhamento podem ser criadas, permitindo uma percepção mais próxima à realidade da manutenção preditiva em máquinas rotativas industriais. Para isso, o projeto conceitual, a seleção de materiais necessários e a fabricação das partes mecânicas foram realizadas. Como resultado, obteve-se o protótipo da bancada didática para análise de vibrações, a qual está disponível para utilização no Laboratório de Vibrações, bem como do projeto completo para que esse protótipo possa também ser implementado em outras instituições de ensino.

Palavras-chave: Vibrações. Desbalanceamento. Desalinhamento. Bancada Didática. Análise de vibrações.

ABSTRACT

GARDIM, Roberto. Didactic Basis of Vibration Analysis. 2018. 42 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso Tecnologia em Manutenção Industrial - Federal University of Technology - Paraná. Guarapuava, 2018.

Vibrations on rotating machines occur in a variety of ways and with varying frequency, depending on the cause factor they are subjected to, which leads to fatigue and subsequent breakdown of their components. Unbalance, as well as misalignment, are determining factors for these failures to occur. In this way, it is necessary to periodically and systematically monitor the machines, thus avoiding unexpected stops. Practical knowledge, combined with theoretical knowledge, provides a broader view of causation and possible solutions. This work aimed to develop a didactic workbench for vibration analysis, where several simulated situations of imbalance and misalignment can be created, allowing a perception closer to the reality of predictive maintenance in industrial rotary machines. For this, the conceptual design, the selection of necessary materials and the manufacturing of the mechanical parts were carried out. As a result, we obtained the prototype of the didactic bench for vibration analysis, which is available for use in the Laboratory of Vibrations, as well as the complete project so that this prototype can also be implemented by other educational institutions.

Keywords: Vibrations. Unbalance. Misalignment. Didactic bench. Analysis of vibrations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (A) Excitação determinística ou periódica e (B) excitação aleatória.....	14
Figura 2: Desbalanceamento (A) Estático, (B) Dinâmico e (C) Combinado.	18
Figura 3: Desalinhamento Paralelo: vertical e horizontal.	19
Figura 4: Desalinhamento angular: vertical e horizontal.....	19
Figura 5: Desalinhamento combinado: vertical e horizontal.	19
Figura 6: Desalinhamentos do tipo (A) angular vertical, (B) angular horizontal e (C) paralelo.	20
Figura 7: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.....	21
Figura 8: Bancada de análise de vibrações.	24
Figura 9: Base inferior da bancada.	26
Figura 10: Base do motor.	27
Figura 11: Base para mancais.....	27
Figura 12: Eixo 1 - Mancais e acoplamento.	28
Figura 13: Eixo 2 para mancais, discos de desbalanceamentos e acoplamento.	28
Figura 14: Bucha para fixação dos Discos de Desbalanceamento.	28
Figura 15: Disco de Desbalanceamento.	29
Figura 16: Bancada didática de análise de vibrações, onde as indicações A, B e C são referentes ao tipo de movimento das partes.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critério de severidade de vibração recomendados para máquinas de uso geral com rotação entre 600 e 12000 RPM (ISO 2372).	16
Tabela 2: Classes de máquinas.	16
Tabela 3: Critérios de Severidade de Vibração. Recomendado para grandes máquinas de baixa velocidade com rotação entre 600 e 1200 rpm (ISO 3945).	17
Tabela 4: Componentes principais da bancada didática de vibrações.....	25
Tabela 5: Materiais comerciais e seu custo, em julho de 2018.	25
Tabela 6: Materiais para fabricação e seu custo, em julho de 2018.....	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2 JUSTIFICATIVA	12
3 REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 VIBRAÇÕES	13
3.1.1 Vibração livre e vibração forçada (RAO, 2008)	13
3.1.2 Vibração não amortecida e amortecida (RAO, 2008)	13
3.1.3 Vibração linear e não linear (RAO, 2008)	13
3.1.4 Vibração determinística e aleatória	14
3.2 LIMITES DE ACEITAÇÃO DE VIBRAÇÃO	14
3.3 VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ROTATIVAS	15
3.4 DESBALANCEAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS	17
3.5 DESALINHAMENTO DE CONJUNTOS	18
3.5.1 Métodos utilizados para alinhamento de conjuntos	20
4 METODOLOGIA	21
4.1 PROJETO DA BANCADA	21
4.2 PROCESSOS DE USINAGEM	21
4.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM	22
4.4 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO	23
5 RESULTADOS	24
5.1 O PROJETO DA BANCADA EM 3D	24
5.2 COMPONENTES E MATERIAIS COMERCIAIS	25
5.3 DETALHAMENTO DOS COMPONENTES FABRICADOS	26
5.4 MONTAGEM DA BANCADA	29
6 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32
APÊNDICE I – BASE DA BANCADA	33
APÊNDICE II – BASE DO MOTOR	34
APÊNDICE III – BASE DOS MANCAIS 1 E 2	35
APÊNDICE IV – BASE DOS MANCAIS 3 E 4	36
APÊNDICE V – EIXO 1	37
APÊNDICE VI – EIXO 2	38
APÊNDICE VII – BUCHA PARA DISCO DE DESBALANCEAMENTO	39
APÊNDICE VIII – DISCO DE DESBALANCEAMENTO	40
APÊNDICE IX – SUPORTE DA CAIXA DE ACIONAMENTO CHAPA 2 MM	41

1 INTRODUÇÃO

Máquinas rotativas estão presentes em praticamente todos os equipamentos industriais e cada vez mais são submetidas a grandes esforços, elevadas rotações e funcionamento contínuo, fazendo com que apresentem fadiga ou alterem as características do funcionamento para a qual foram projetadas. Diante disso, faz-se necessário um acompanhamento periódico das condições de operações dessas máquinas. Isso é possível através da manutenção preditiva, que se utiliza de tecnologia e técnicos treinados para realização do acompanhamento dessas máquinas.

O custo inicial para implantação da manutenção preditiva é maior quando comparado ao custo da manutenção preventiva, pois depende de equipamentos apropriados e técnicos qualificados para execução das atividades e por isso, nem todos os ativos industriais estão submetidos a esse tipo de manutenção. Normalmente, é feito um mapeamento, que classifica esses ativos quanto à importância para o processo, ciclos e condições de trabalho aos quais são expostos e grau de manutenibilidade (DHILLON, 2006). Dentre vários métodos utilizados pela manutenção preditiva para detecção de anomalias, destaca-se a análise de vibrações.

As vibrações são movimentos oscilantes das máquinas, ou elementos que a compreendem, em torno de um ponto de referência. Muitas causas desencadeiam vibrações tais como: estrutura frágil para determinado tipo de máquina, sistema de fixação inadequado, desalinhamento de conjuntos, desbalanceamento, desgaste de elementos girantes e não girantes (mancais, alojamento de rolamentos ou buchas), entre outros.

A medição dos níveis de vibração pode ser realizada por meio de três sistemas de instrumentação, segundo Cyrino (2015). No primeiro, com um medidor de nível de vibração global (sem filtro), se mede a vibração total resultante de todas as frequências de vibração captadas pelo instrumento. No segundo sistema, utiliza-se um medidor de vibração com análise de frequência (com filtro), onde se mede a vibração global em uma larga faixa de frequência, refletindo os níveis de vibração com frequência dominante do espectro. No terceiro sistema são usados analisadores de frequência por transformada de Fourier, onde se utiliza uma ferramenta matemática capaz de transformar um sinal randômico, periódico ou

transitório numa série de Fourier equivalente. A ferramenta matemática baseia-se na propriedade de que qualquer sinal pode ser decomposto em uma série infinita de frequência que representa o sinal de domínio dessa frequência.

Cada vez mais, as indústrias buscam redução nos custos de manutenção, maior disponibilidade de seus ativos e alta produtividade. A análise de vibração é a técnica que possui melhor custo/benefício, em comparação com as demais técnicas preditivas, possibilitando leituras do estado dos equipamentos em tempo real, sem a necessidade de parada para realização das medições, monitorando níveis de desgaste dos elementos das máquinas, utilizando ao máximo o tempo de vida útil das peças. Desta forma evitam-se gastos e paradas desnecessárias, aumentando a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, elevando a produtividade (FOGLIATTO, RIBEIRO, 2009).

Vale ressaltar que os técnicos em manutenção preditiva, para realizar a análise de vibração, além de conhecimentos relativos a operação do aparelho de medição e do equipamento industrial em questão, precisam ter boas noções das características físicas e mecânicas dos elementos das máquinas submetidos à análise, pois o resultado de vibrações é um complexo de frequências que caracteriza o sistema (MARÇAL, SUSIN, 2005).

É de fundamental importância um conhecimento prático dos procedimentos a serem seguidos, para que a máquina tenha seu funcionamento correto e manutenção realizada de forma adequada. Devido a isso, uma bancada didática de análise de vibrações proporciona aos estudantes uma aplicação real dos conhecimentos teóricos adquiridos. Além disso, permite a realização de diversas simulações, onde podem ser criadas situações adversas à forma correta do comportamento das máquinas, com opções de desalinhamento e desbalanceamento de elementos girantes.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma bancada didática para análise de vibrações.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dimensionar a estrutura da bancada e seus componentes;

- Realizar o desenho técnico dos componentes que deverão ser fabricados;
- Realizar a especificação dos componentes comercialmente disponíveis;
- Realizar a especificação das matérias primas, ferramentas e consumíveis;
- Fabricar os componentes necessários da bancada de vibrações;
- Montar a bancada didática no Laboratório de Vibrações da UTFPR-GP.

2 JUSTIFICATIVA

Muitos profissionais formados em áreas de manutenção, em especial aos tecnólogos e engenheiros, não tiveram oportunidade de desenvolver na prática seus conhecimentos teóricos adquiridos no decorrer de sua formação. Hoje, estes profissionais estão no mercado de trabalho sem terem conhecimento prático a respeito de manutenção preditiva, em especial a análise de vibração, bem como os elementos das máquinas e suas aplicações. Frente a isso, observou-se que é necessário o desenvolvimento de materiais didáticos que permitam proporcionar estudos práticos, com diferentes situações para melhor assimilação dos conhecimentos teóricos aprendidos.

As empresas buscam reduzir seus custos de manutenção e aumentar o lucro de sua produção. Para que os custos sejam reduzidos e os lucros sejam maiores, a disponibilidade e confiabilidade das máquinas precisam ser maiores, e a manutenção preditiva é uma tendência a ser aplicada para evitar falhas e baixar o custo com mão de obra e peças. A análise de vibração com baixo custo e elevado grau de benefício é uma importante técnica preditiva para tornar isso possível.

Desta forma, no presente trabalho desenvolveu-se uma bancada didática de análise de vibrações para ser utilizada nos cursos tecnológicos da UTFPR, Campus Guarapuava, para estudos práticos de disciplinas teóricas de vibrações, manutenção preditiva, entre outras.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 VIBRAÇÕES

As vibrações ocorrem através de movimentos oscilatórios de corpos e forças associadas a eles. As massas presentes nos corpos provocam a vibração, e esta, por sua vez, contribui para que ocorram falhas nos elementos que compõem as máquinas. Sendo assim, as máquinas e estruturas sujeitas a vibrações devem ter seu comportamento avaliado durante a operação, para que nenhuma alteração incida em falhas estruturais ou de seus componentes (DA SILVA, 2012).

Nas máquinas industriais em condições dinâmicas, as vibrações são geralmente desencadeadas por fatores relacionados aos elementos que a compõem, bem como sua estrutura e sistemas de fixação.

Segundo Rao (2008), as vibrações podem ser classificadas de diversas maneiras, sendo algumas de maior importância, como será abordado a seguir.

3.1.1 Vibração livre e vibração forçada (RAO, 2008)

A vibração livre ocorre em um sistema onde existe uma vibração inicial e esta vibração permanece sem que haja força externa agindo sobre o sistema.

Já a vibração forçada ocorre quando um sistema possui vibração devido a forças externas, ou seja, quando a frequência da força externa está na mesma frequência natural do sistema, causando o fenômeno da ressonância, que induz o sistema a oscilar com maior amplitude.

3.1.2 Vibração não amortecida e amortecida (RAO, 2008)

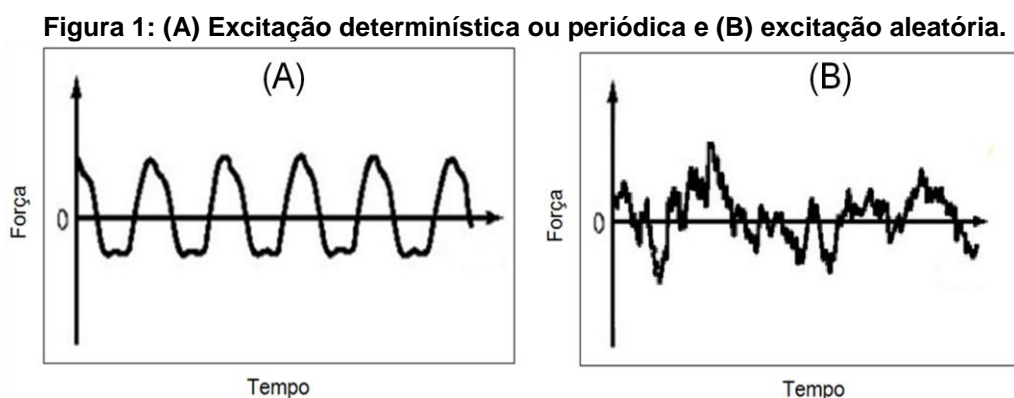
No caso da vibração não amortecida não ocorrem perdas nem dissipação de energia, seja por atrito ou outra resistência durante a oscilação. Já nas vibrações do tipo amortecida alguma energia é perdida decorrente de atritos ou resistências, alterando a oscilação do sistema.

3.1.3 Vibração linear e não linear (RAO, 2008)

A vibração linear é aquela onde todos os componentes básicos do sistema se comportam de maneira linear, ou seja, quando há proporção entre o deslocamento que o componente sofre e a força aplicada. Do contrário, se houve alguma não linearidade, diz-se que a vibração é do tipo não linear, existindo diferenciais oscilatórios entre os componentes de um mesmo sistema.

3.1.4 Vibração determinística e aleatória

A vibração resultante de forças ou movimentos conhecidos a qualquer instante de tempo dentro do sistema é chamada de vibração determinística ou periódica. A Figura 1A mostra graficamente o comportamento de uma vibração do tipo periódica, onde o tipo de excitação é repetido ao longo do tempo.



Fonte: Rao, 2008.

Caso não seja possível prever o valor da excitação em um dado instante de tempo, as oscilações ocorrem de forma aleatória, por isso é chamada de vibração aleatória. A A Figura 1B mostra graficamente um exemplo excitações que causam vibrações desta natureza.

3.2 LIMITES DE ACEITAÇÃO DE VIBRAÇÃO

Segundo, Kardec e Nascif (2012), algumas recomendações foram adotadas de forma universal como o limite de aceitação de vibração em máquinas rotativas. O API, Instituto Americano de Petróleo (*American Petroleum Institute*) recomenda que máquinas como compressores centrífugos, turbinas a vapor, turbinas a gás, redutores e multiplicadores, operando em velocidade máxima ou dentro da faixa

especificada de operação, com rotores montados e balanceados, não excedam o valor de amplitude do deslocamento de vibração sem filtro ou 2,0 mills (50 microns), o que for menor.

Para efeito de cálculo de amplitude de vibração, utilizam-se as equações 1 e 2, dependendo do sistema de medidas, onde a Equação 1 é utilizada para medidas no sistema inglês e a Equação 2 é utilizada para medidas no sistema métrico.

$$A = \sqrt{\frac{12.000}{N}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$A = 25,4 \sqrt{\frac{12.000}{N}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde A é a amplitude da vibração sem filtro, medida em Mills ou microns pico a pico e N é a velocidade máxima contínua, medida em rotações por minuto. A vibração não deve exceder 150% do máximo valor registrado para a velocidade máxima contínua.

3.3 VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ROTATIVAS

As vibrações em máquinas rotativas são facilmente identificadas através de análises de vibrações, as quais são realizadas por meio de equipamentos específicos para este fim. Os problemas apontados na análise dessas vibrações são podem estar relacionados a desbalanceamentos, desalinhamentos, defeitos em rolamentos, defeitos estruturais e sistemas de fixação deficiente, entre outros (CYRINO, 2017).

De acordo com Kardec e Nascif (2012), a ISO 2372 e 3945, fornece gráficos bastante utilizados na Europa para verificação e avaliação dos níveis de vibração das máquinas rotativas, onde é medida a vibração na carcaça, e em local específico de cada mancal. A Tabela 1 demonstra graficamente os critério de severidade de vibração recomendados para máquinas de uso geral com rotação entre 600 e 12000 RPM (KARDEC; NASCIF, 2012), onde os valores contidos estão em RMS para as respectivas velocidades.

Tabela 1: Critério de severidade de vibração recomendados para máquinas de uso geral com rotação entre 600 e 12000 RPM (ISO 2372).

Faixas de severidade de vibração radial			Julgamento de qualidade para classes separadas de máquinas			
Faixa	Velocidade em RMS na faixa de 10-1.000Hz (limites de faixa)		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
	mm/s	in/s				
0,28	0,28	0,011	A	A	A	A
0,45	0,45	0,018				
0,71	0,71	0,028				
1,12	1,12	0,044	B	B	B	A
1,8	1,8	0,071				
2,8	2,8	0,11	C	C	B	B
4,5	4,5	0,18				
7,1	7,1	0,28	D	D	C	B
11,2	11,2	0,44				
18	18	0,71				
28	28	1,1	D	D	D	D
45	45	1,8				
71	71	2,7				

Fonte: Kardec e Nascif, 2012.

Para se interpretar o julgamento de qualidade para classes separadas de máquinas mostrados na **Tabela 1**, é necessário que se consulte a **Tabela 2**, que mostra quais são as classes de máquinas (KARDEC; NASCIF,2012).

Tabela 2: Classes de máquinas.

CLASSES DE MÁQUINAS		CONDIÇÃO
Classe I - Máquinas pequenas até 20 HP	A	BOM
Classe II - Máquinas médias de 20 a 100 HP	B	SATISFATÓRIO
Classe III - Máquinas grandes 10-200 rev/seg, 400 HP e maiores montadas em suportes rígidos	C	INSATISFATÓRIO
Classe IV - Máquinas grandes 10-200 rev/seg, 400 HP e maiores montadas em suportes flexíveis	D	INACEITÁVEL

Fonte: Kardec e Nascif, 2012.

Além disso, o tipo de suporte para as máquinas também influenciam nos níveis de vibrações considerado aceitável, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Critérios de Severidade de Vibração. Recomendado para grandes máquinas de baixa velocidade com rotação entre 600 e 1200 rpm (ISO 3945).

Nível de velocidade de vibração medido em RMS in 1.000 Hz de largura de faixa (bandwith)		Classificação do suporte	
mm/seg	in/sec	Suporte rígido	Suporte flexível
0,46	0,018	BOM	BOM
0,71	0,028		
1,12	0,044		
1,8	0,071		
2,8	0,11	SATISFATÓRIO	SATISFATÓRIO
4,5	0,18	INSATISFATÓRIO	
7,1	0,28		INSATISFATÓRIO
11,2	0,44		
18	0,71	INACEITÁVEL	INACEITÁVEL
28	1,1		
46	1,8		
71	2,8		

Fonte: Kardec e Nascif, 2012.

3.4 DESBALANCEAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

A presença de massa excêntrica em disco rotativo causa vibrações, a qual é aceitável até certo nível. Quando a vibração excede os níveis máximos permitidos, é necessário que se adicione massa em determinada posição que cancele o desbalanceamento do disco, utilizando-se de métodos experimentais. Na prática, os desbalanceamentos ocorrem devido a irregularidades, causados por erros de fabricação ou elementos utilizados em sua montagem (RAO, 2008).

Vale ressaltar que desbalanceamentos também podem ocorrer devido a outros fatores tais como condições de local e operação, aos esforços que as máquinas estão submetidos, podendo implicar em fadiga e desgaste do próprio material em decorrência de temperaturas adversas, bem como do tipo de produto ao qual o equipamento está exposto.

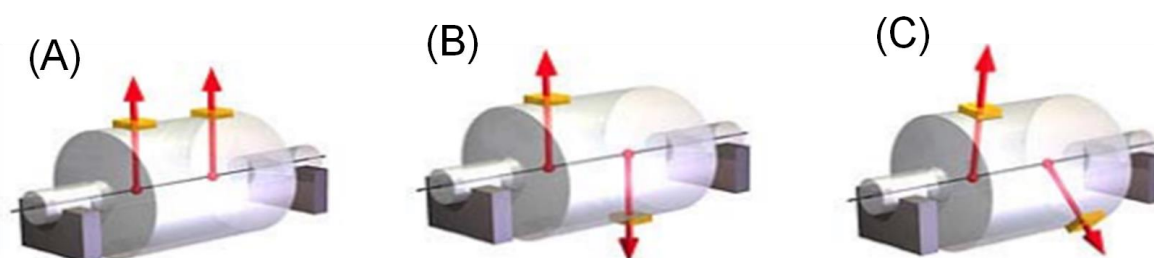
De acordo com Senko e colaboradores (2013), a maior causa de vibrações em máquinas rotativas está associada ao desequilíbrio de massas em relação ao eixo de rotação. Dessa forma, com o desbalanceamento, outras partes do sistema podem sofrer danos.

Todas máquinas rotativa possui um determinado desbalanceamento, porém com graus diferentes. Há basicamente dois tipos de desbalanceamentos, o estático

e o dinâmico. Contudo, ambos podem ocorrer ao mesmo tempo, fazendo com que aconteça um desbalanceamento combinado (ARCO-VERDE, 2008).

No desbalanceamento estático, o rotor possui um ou mais pontos de massa com posição angular próximas, gerando uma força centrífuga, fazendo com que o rotor mantenha essas massas para baixo, quando apoiado em dois mancais, como mostra a Figura 2A.

Figura 2: Desbalanceamento (A) Estático, (B) Dinâmico e (C) Combinado.



Fonte: Arco-Verde, 2008.

Já o desbalanceamento dinâmico ocorre juntamente com a rotação, pois a linha de centro de massa não coincide com a linha geométrica de rotação. O rotor não apresenta posição definida em seu estado de repouso, como mostra a Figura 2B.

Entretanto, a situação mais frequente de desbalanceamento encontrada na prática ocorre quando existe uma combinação de desbalanceamento estático e desbalanceamento dinâmico ao mesmo tempo, como mostra a Figura 2C.

Para que sejam realizados balanceamentos em equipamentos de grande porte, como turbinas hidráulicas e a gás, é necessário elevado grau de qualidade nos ajustes de balanceamentos. Porém, devido à dificuldade de testes frequentes, estes equipamentos são balanceados apenas antes de serem postos em operação (CAMPOS, 2017).

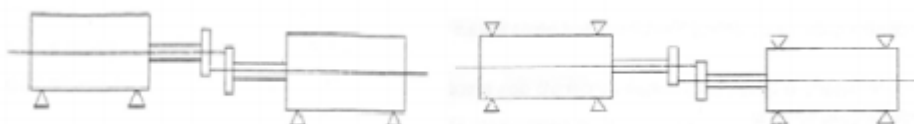
3.5 DESALINHAMENTO DE CONJUNTOS

Em máquinas rotativas submetidas a um determinado sistema de conjunto para seu acionamento, podem-se encontrar diversas características que demonstram desalinhamentos. Estes desalinhamentos por sua vez, são responsáveis por vibrações, desgastes ou quebras de elementos, causando paradas

inesperadas nas máquinas. A seguir são mostradas as definições dos diferentes tipos de desalinhamentos com figuras que os exemplificam.

- Desalinhamento paralelo de acoplamentos (Figura 3): ocorre quando o centro do eixo motriz está desencontrado verticalmente, ou horizontalmente com o centro do eixo movido, porém mantém paralelismo entre ambos.

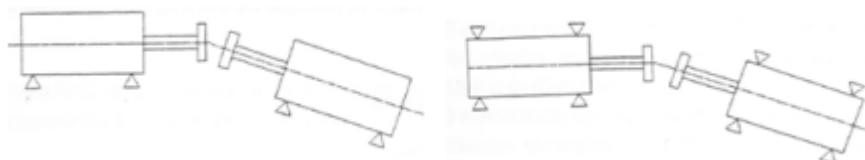
Figura 3: Desalinhamento Paralelo: vertical e horizontal.



Fonte: Bomfim, 2013.

- Desalinhamento angular de acoplamentos (Figura 4): ocorre quando os eixos não estão paralelos entre si, e possui um desencontro vertical, ou horizontal entre eles.

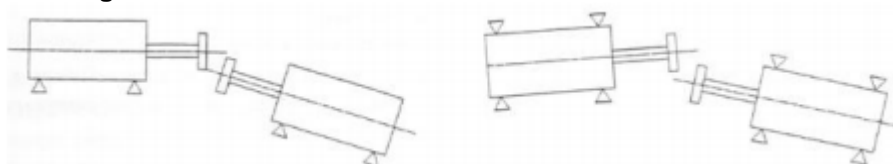
Figura 4: Desalinhamento angular: vertical e horizontal.



Fonte: Bomfim, 2013.

- Desalinhamento combinado de acoplamentos: ocorre quando existe ao mesmo tempo o desalinhamento do tipo paralelo e angular, como mostra a Figura 5.

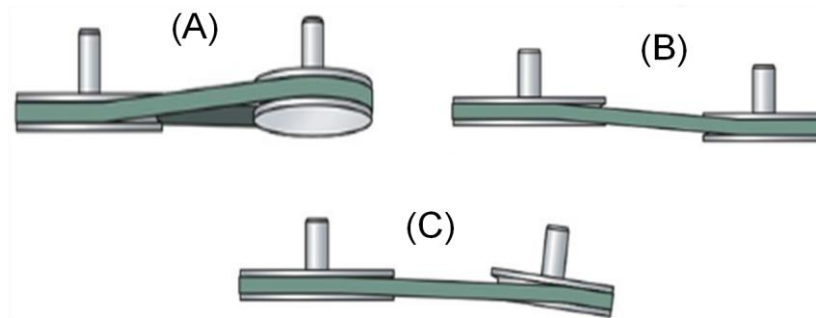
Figura 5: Desalinhamento combinado: vertical e horizontal.



Fonte: Bomfim, 2013.

- Desalinhamento de polias ou engrenagens: pode ocorrer de forma angular vertical (Figura 6A), angular horizontal (Figura 6B) ou paralelo (Figura 6C).

Figura 6: Desalinhamentos do tipo (A) angular vertical, (B) angular horizontal e (C) paralelo.



Fonte: SKF, 2018.

3.5.1 Métodos utilizados para alinhamento de conjuntos

Depois de verificadas as anomalias nas vibrações resultantes de desalinhamentos, alguns métodos podem ser utilizados para corrigir o alinhamento de eixos, acoplamentos, polias ou engrenagens, desde os mais simples até utilização de equipamentos sofisticados e de maior precisão, dependendo da rotação, torque e ciclos de operação das máquinas.

- Régua ou calibre de folga: utilizado em equipamentos de baixa rotação, possui pouca precisão;
- Relógios comparadores: ainda bastante utilizado nas indústrias, possui boa precisão, sendo utilizado em máquinas de alta rotação ou torque elevado somente quando não houver espaço suficiente para instalar o alinhador a laser;
- Alinhador a laser: equipamento sofisticado com elevado grau de precisão, utilizado em máquinas de alta rotação e elevado torque de trabalho.

Dada a importância que as vibrações de máquinas têm e considerando todos os aspectos teóricos relacionados ao seu estudo, o presente trabalho de construção da bancada didática permitirá que sejam aplicados na prática os conhecimentos, técnicas e análises que foram descritos.

4 METODOLOGIA

Para desenvolver o presente trabalho, seguiu-se o fluxograma da Figura 7. É importante destacar que para a seleção de materiais considerou-se a utilização de materiais de fácil e econômica aquisição na cidade de Guarapuava.

Figura 7: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autoria própria

4.1 PROJETO DA BANCADA

Foi definido o modelo de bancada a qual contemplou a utilização dos componentes necessários para a realização de diferentes situações, de forma que possibilitasse o estudo e análise de vibrações utilizando simulações de diferentes pontos de desbalanceamentos e desalinhamentos. Para desenvolvimento do modelo foi utilizado software AutoCAD (Autodesk) para o desenho em 3D e 2D das peças e da montagem da bancada.

4.2 PROCESSOS DE USINAGEM

Para fabricação das peças no processo de usinagem, utilizou-se torno Universal Nardine e fresadora Diplomat.

Foi realizado faceamento em dois eixos de 25 mm de diâmetro, com velocidade de desbaste de 400 rpm e velocidade de acabamento em 1600 rpm, com

profundidade de corte de 1 mm para desbaste e 0,5 mm para acabamento, deixando o Eixo 1 e o Eixo 2 com medidas finais em seus comprimentos de 340 mm e 370 mm, respectivamente.

Na fabricação das buchas para fixação dos discos de desbalanceamento, utilizaram-se dois tarugos redondos de aço, com medidas brutas de 85 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento cada, deixando-os com medidas finais de 75 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento. Em seguida, foi rebaixado parte do diâmetro em 45 mm com comprimento de 10 mm, para o encaixe do disco de desbalanceamento. Também foi feito um furo inicial no centro do tarugo, com broca 16 mm, e em seguida aberto furo no torno para 25 mm. A velocidade de desbaste e acabamento e a profundidade de corte foram às mesmas utilizadas nos Eixos 1 e 2.

O mesmo procedimento de abertura do furo do tarugo foi utilizado para abertura do acoplamento e do disco de desbalanceamento, os quais ficaram com diâmetro do furo de 25 mm e 45 mm respectivamente, sendo que o disco de desbalanceamento ficou com diâmetro externo 200 mm e espessura 10 mm.

Para abertura dos canais de chaveta, tanto dos eixos, quanto das buchas e acoplamento, foi utilizada a fresadora, com uma fresa de 8 mm. Os acabamentos finais dos canais de chaveta dos furos foram feitos com uma lima, de forma manual.

Os discos de desbalanceamentos passaram ainda por um processo de furação com broca 9 mm e rosqueamento com macho M10, totalizando 16 furos de forma simétrica ao longo do diâmetro do disco, dispostos em duas carreiras. Para esse processo utilizou-se furadeira manual da marca Skill e ferramenta para fazer roscas da marca Gedore.

4.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM

Para os processos soldagem necessários utilizou-se eletrodo revestido 6013 e 7018, que são eletrodos específicos para soldagem de aços. Utilizou-se equipamento Inversor Bambozzi, com aproximadamente 80 A. Previamente aos processos de soldagem, as partes foram lixadas com lixadeira Black&Decker, com disco flap. Após a finalização das soldas foi utilizada massa plástica 2001, composta por talco mineral inorgânico, titânio mineral e resina de poliéster, para acabamento final.

4.4 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

Foi realizada a fabricação de proteções para os elementos girantes, onde se utilizou chapas de acrílico de 3 e 5 mm e sua conformação deu-se através do aquecimento das chapas com soprador térmico da marca Black & Decker.

A fabricação das peças e montagem da bancada foi realizada no laboratório de Processos de Fabricação e Usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Guarapuava.

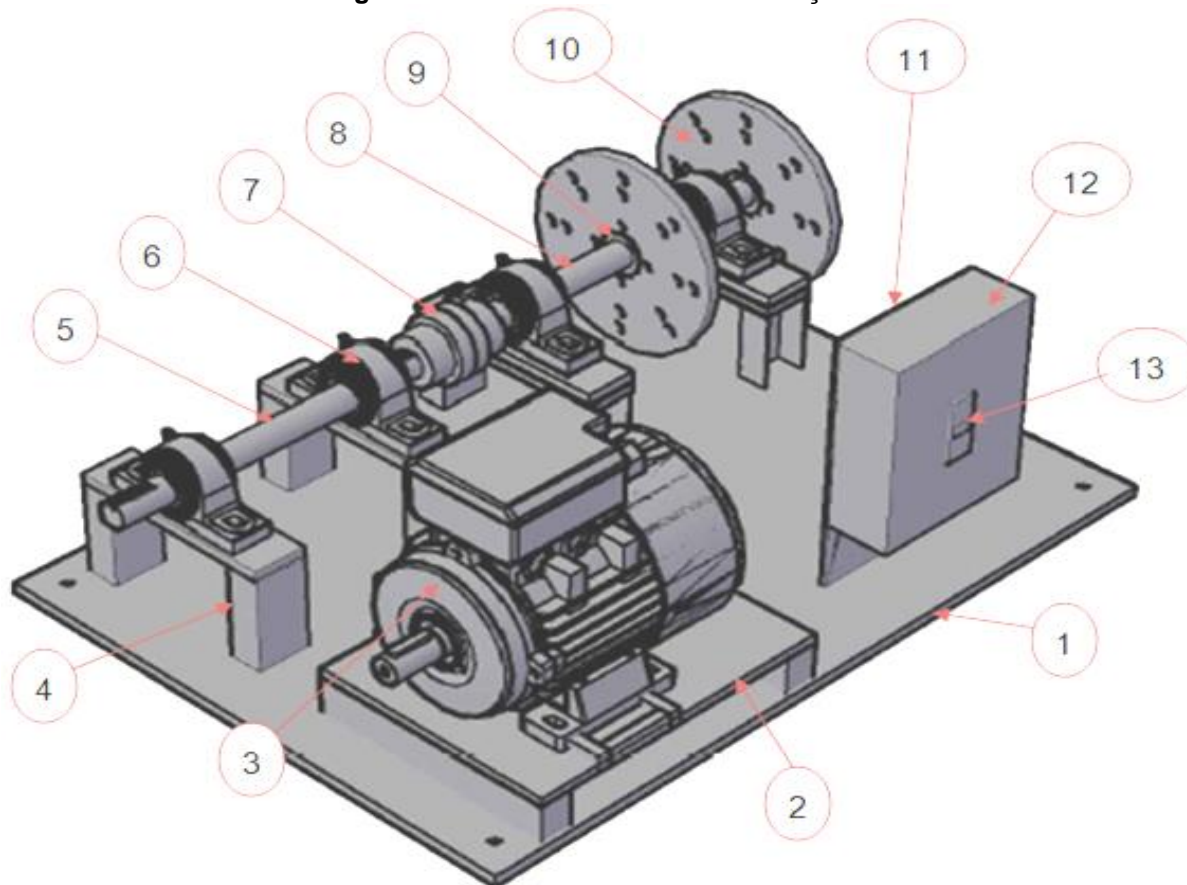
5 RESULTADOS

5.1 O PROJETO DA BANCADA EM 3D

Definiu-se a utilização de dois eixos, Eixo 1 e Eixo 2, que unidos através de um acoplamento elástico permite desalinhar deliberadamente o sistema para análise de vibrações.

No eixo 2 foram colocados dois discos perfurados para que através da inserção de parafusos, seja possível causar o desbalanceamento do sistema. De modo geral, a Figura 8 mostra a bancada montada.

Figura 8: Bancada de análise de vibrações.



Fonte: Autoria própria

As indicações numéricas da Figura 8 são relativas aos componentes que SÃO mostrados na Tabela 4, onde estão expressos os números correspondentes e a sua descrição.

Tabela 4: Componentes principais da bancada didática de vibrações.

N°	Descrição	N°	Descrição
1	Base da bancada	8	Eixo 2
2	Base do motor	9	Bucha do disco de desbalanceamento
3	Motor	10	Disco de desbalanceamento
4	Base do mancal	11	Suporte da caixa de acionamento
5	Eixo 1	12	Caixa de acionamento
6	Mancal	13	Disjuntor
7	Acoplamento		

Fonte: Autoria própria.

5.2 COMPONENTES E MATERIAIS COMERCIAIS

Depois da definição do modelo, realizou-se a cotação e seleção de componentes, como mostra a Tabela 5, totalizando um custo de R\$ 639,32, com a tomada de preços realizada no mês de julho de 2018.

Tabela 5: Materiais comerciais e seu custo, em julho de 2018.

Qnt.	Especificação dos componentes comerciais	Valor (R\$)
01	Motor ¼" cv, 1730 RPM	335,00
04	Mancais P-205	56,32
04	Rolamentos UC-205	47,68
01	Acoplamento elástico de garras E-67	45,80
01	Caixa para disjuntor em PVC	15,50
01	Disjuntor Tramontina TR3KA C20 IP20	12,00
06	Absorvedores de impacto	48,00
20	Parafuso M10 x 35 mm	20,71
04	Parafusos M10 x 60 mm	5,79
16	Arruelas M10	2,06
10	Parafusos M10 x 25 mm	9,20
34	Porcas M10	8,60
08	Parafusos M8 x 25 mm	3,60
04	Parafusos M8 x 20 mm	1,70
18	Porcas M8	3,82
22	Arruelas M8	1,42
04	Parafusos ¼" x ¾"	1,60
04	Porcas ¼"	0,40
16	Parafusos M5 x 20 mm	5,89
16	Porcas borboletas M5	14,23
Total		639,32

Fonte: Autoria própria.

Para fabricação dos componentes que não são disponíveis comercialmente, mas que necessitam de usinagem e outros processos de fabricação, realizou-se a sua cotação e especificação, conforme mostra a Tabela 6, totalizando um custo de R\$483,41, com a tomada de preços também realizada no mês de julho de 2018.

Tabela 6: Materiais para fabricação e seu custo, em julho de 2018.

Qnt.	Especificação dos componentes para fabricação	Valor (R\$)
------	---	-------------

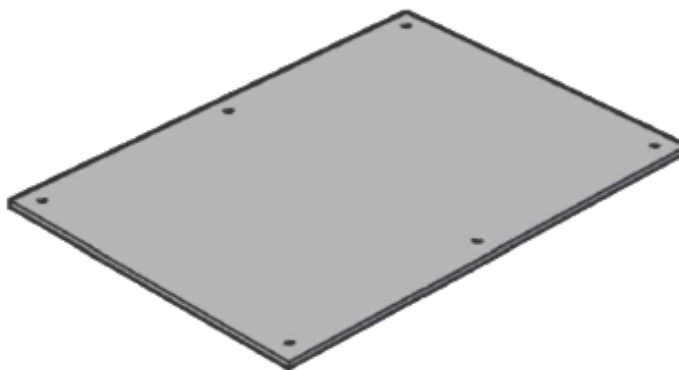
02	Eixo trefilado 25 mm x 1000 mm aço 1045	51,46
02	Tarugos redondos 8" x 10 mm em alumínio 6061	99,40
01	Chapa de aço carbono AISI 1020, 3/8" x 550 mm x 750 mm	185,00
01	Chapa de aço carbono AISI 1020, 5/16" x 200 mm x 300 mm	35,00
01	Tubo retangular de aço AISI 1020, 3 mm x 30 mm x 50 mm x 1000 mm	3,50
01	Viga "U" em aço AISI 1020, 3 mm x 30 mm x 50 mm x 400 mm	3,50
02	Tarugos em aço carbono 30 mm x 85 mm	9,75
01	Chapa acrílico 5 mm x 1000 mm x 1000 mm	50,00
02	Chapa acrílico 3 mm x 400 mm x 400 mm	45,80
Total		483,41

Fonte: Autoria própria.

5.3 DETALHAMENTO DOS COMPONENTES FABRICADOS

Na Figura 9 está representada a base inferior da bancada, que foi fabricada a partir da chapa de aço carbono AISI 1020, de 750 mm x 550 mm, com espessura de 3/8". Nesta base, foram fixados todos os componentes.

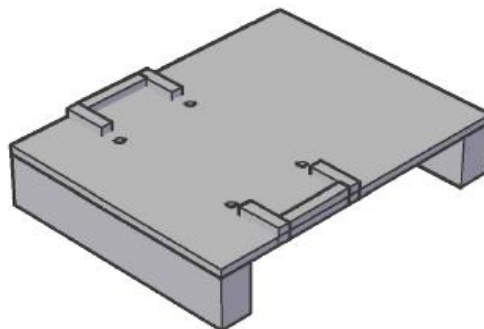
Figura 9: Base inferior da bancada.



Fonte: Autoria própria

Para facilitar a montagem do motor, é necessária a fabricação de uma base com furação equivalente ao encaixe do motor comercialmente disponível. A Figura 10 mostra em vista isométrica a base do motor. Essa base foi soldada na base da bancada (Figura 9).

Figura 10: Base do motor.

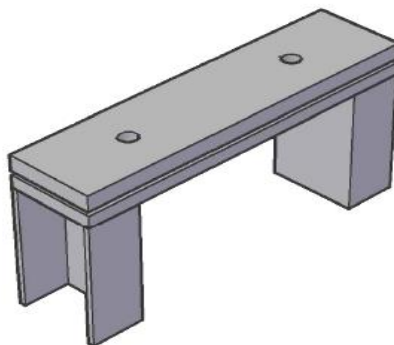


Fonte: Autoria própria.

Foi realizado um cordão de solda para unir as partes, que foram lixadas previamente com lixadeira para remover todas as sujeiras das superfícies e promover melhor qualidade no cordão de solda. Após a finalização da solda, foi utilizada massa plástica para acabamento final.

De forma semelhante à base do motor, os mancais de rolamento P205, disponíveis comercialmente, também necessitam de uma base para fixação, conforme mostra a Figura 11. As bases dos mancais também foram soldadas na base da bancada (Figura 9).

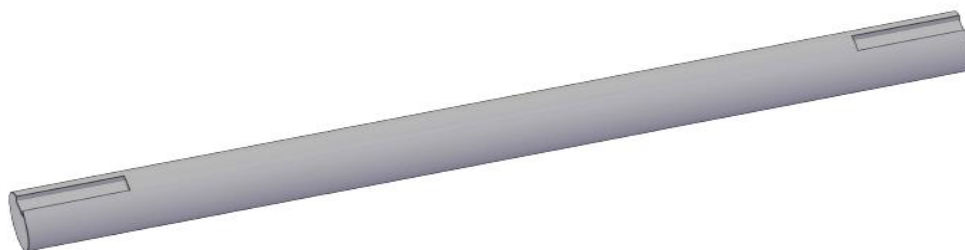
Figura 11: Base para mancais.



Fonte: Autoria própria.

O Eixo 1, contendo os rasgos de chaveta para fixação da polia de acionamento e do acoplamento elástico, é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Eixo 1 - Mancais e acoplamento.



Fonte: Autoria própria.

O Eixo 2 possui um rasgo de chaveta em uma de suas extremidades para o acoplamento e outros dois rasgos de chaveta para fixação da bucha do disco de desbalanceamento, como mostra a Figura 13.

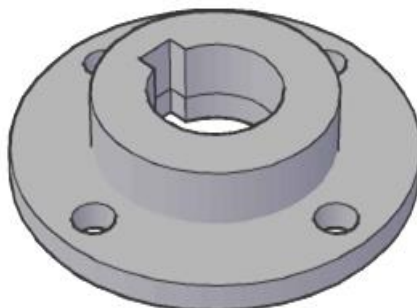
Figura 13: Eixo 2 para mancais, discos de desbalanceamentos e acoplamento.



Fonte: Autoria própria.

Para fixação dos discos de desbalanceamentos, os quais são em alumínio, foi necessário a fabricação de duas buchas de aço, como mostra a Figura 14.

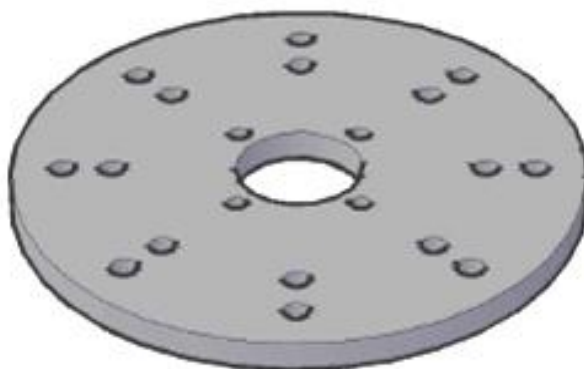
Figura 14: Bucha para fixação dos Discos de Desbalanceamento.



Fonte: Autoria própria.

Os discos de desbalanceamento possuem furos simétricos para fixação de parafusos M10, como mostra a Figura 15, possibilitando dessa forma ocasionar diferentes níveis de vibrações.

Figura 15: Disco de Desbalanceamento.



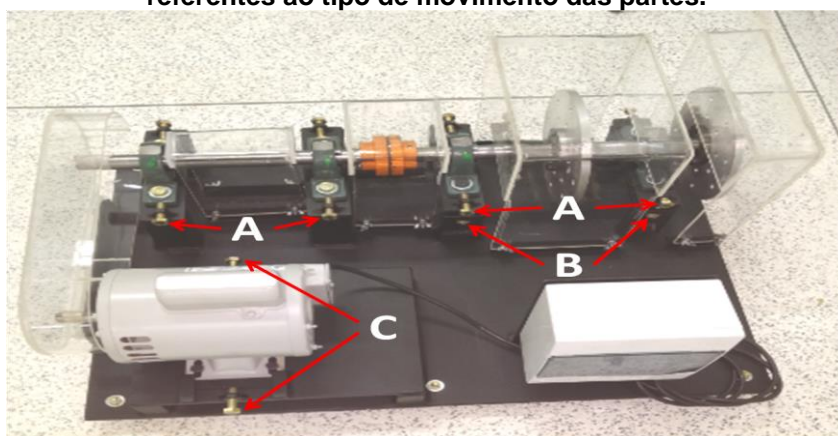
Fonte: Autoria própria.

Todos os desenhos técnicos, contendo as dimensões utilizadas na fabricação das peças estão nos Apêndices I ao IX.

5.4 MONTAGEM DA BANCADA

Após a fabricação e ajuste mecânico de todos os componentes, foi realizada a sua montagem sob a base, seguindo o projeto 3D. A Figura 16 mostra uma fotografia da bancada finalizada.

Figura 16: Bancada didática de análise de vibrações, onde as indicações A, B e C são referentes ao tipo de movimento das partes.



Fonte: Autoria própria.

Complementaram-se os processos de fabricação com pintura na cor preta dos componentes de suporte com tinta spray, para destacar os diversos componentes mecânicos que compõem a bancada.

Em relação à movimentação das partes para promover diferentes tipos de desalinhamento, na Figura 16 estão indicados os parafusos que permitem realizar tais movimentos. Por exemplo, nos mancais do lado esquerdo, com a mudança da posição dos mancais pelo aperto ou afrouxamento dos parafusos indicados como A, é possível causar situações de desalinhamento paralelo horizontal.

Apertando ou afrouxando os parafusos dos mancais do lado direito, também é possível promover o desalinhamento paralelo horizontal. Nesses mancais, ainda é possível, com o aperto ou afrouxamento dos parafusos indicados com a letra B. Para este caso, o desalinhamento paralelo vertical e/ou angular. Adicionalmente, na base de fixação do motor foram colocados parafusos, indicados com a letra C, que permitem a sua movimentação para permitir o aperto da correia de transmissão.

Em relação aos discos perfurados que estão posicionados no eixo 2, a adição de parafusos e porcas nas diferentes posições do disco permite criar desbalanceamento dos diferentes tipos. Por exemplo, se apenas um parafuso for adicionado em um dos furos, cria-se uma situação de desbalanceamento estático. Se forem colocados mais parafusos, mas de forma simétrica, tem-se o desbalanceamento dinâmico. Ao se colocar parafusos em posições aleatórias, é possível gerar desbalanceamento combinado.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo, o desenvolvimento de uma Bancada Didática de Análise de Vibrações, o que foi realizado e concluído em todas as etapas propostas.

Na etapa de realização dos desenhos dos componentes em 3D e sua montagem foi possível se obter uma ideia muito próxima da bancada, o que auxiliou no processo de especificação de materiais comerciais, bem como na definição dos processos de fabricação.

Ao se desenvolver a usinagem e demais processos de fabricação para os componentes de aço, alumínio e acrílico, foi possível serem colocados em prática muitos conhecimentos adquiridos durante o curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial (TMI), não se restringindo às operações de usinagem, mas também medições com diferentes instrumentos de medida, cálculos, análises de ajustagem e técnicas de montagem.

Ao todo, considerando-se apenas o custo com de materiais, sem considerar os custos de mão de obra, energia elétrica, depreciação dos equipamentos de fabricação e consumíveis dos processos de fabricação, gastou-se R\$ 1.122,73.

A bancada construída contribuirá no futuro para proporcionar conhecimentos práticos para os alunos do curso de TMI, bem como dos outros cursos ofertados no campus, como Engenharia Mecânica, permitindo que tenham uma visão mais próxima à realidade industrial.

As situações de anomalias que podem ser geradas com desbalanceamento e desalinhamento, podendo ainda envolver sua combinação, permitirá aos alunos a identificação de como as anomalias modificam os espectros de vibração de forma prática, aliando os conhecimentos teóricos das aulas às situações experimentais.

Também se deve salientar que o desenvolvimento desse projeto poderá despertar em outros alunos o entusiasmo em desenvolver suas aptidões, construindo outros mecanismos didáticos que auxiliem no aprendizado.

REFERÊNCIAS

ARCO-VERDE, M.M. **Identificação de falhas em sistemas rotativos empregando técnicas não-lineares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ, 2008.

BOMFIM, P. R. S. **Estudo experimental da potencialidade do uso da termografia para avaliação do desalinhamento de máquinas rotativas na indústria**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Pernambuco – Recife, 2013.

CAMPOS, R. N. **Análise experimental de balanceamento de rotores pelo método de otimização “Four run method accelerated”**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília, DF, 2017.

CYRINO, L. **Análise de vibração: método de preditiva**. 2015. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/analise-de-vibracoes/>>

CYRINO, L. **Diagnóstico de falhas das vibrações**. 2017. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/diagnostico-de-falhas-das-vibracoes/>>

DA SILVA, B. T. V. **Bancada para análise de vibração: Análise de falhas em máquinas rotativas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Taubaté, SP, 2012.

DHILLON, B.S. **Maintainability, maintenance and reliability for engineers**. London ; New York: CRC Press, 2006. 217 p.

FOGLIATTO, F.S., RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade na manutenção industrial**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, c2009. xvi, 265 p.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção. Função Estratégica**, 4ª ed. Rio de Janeiro, 2012.

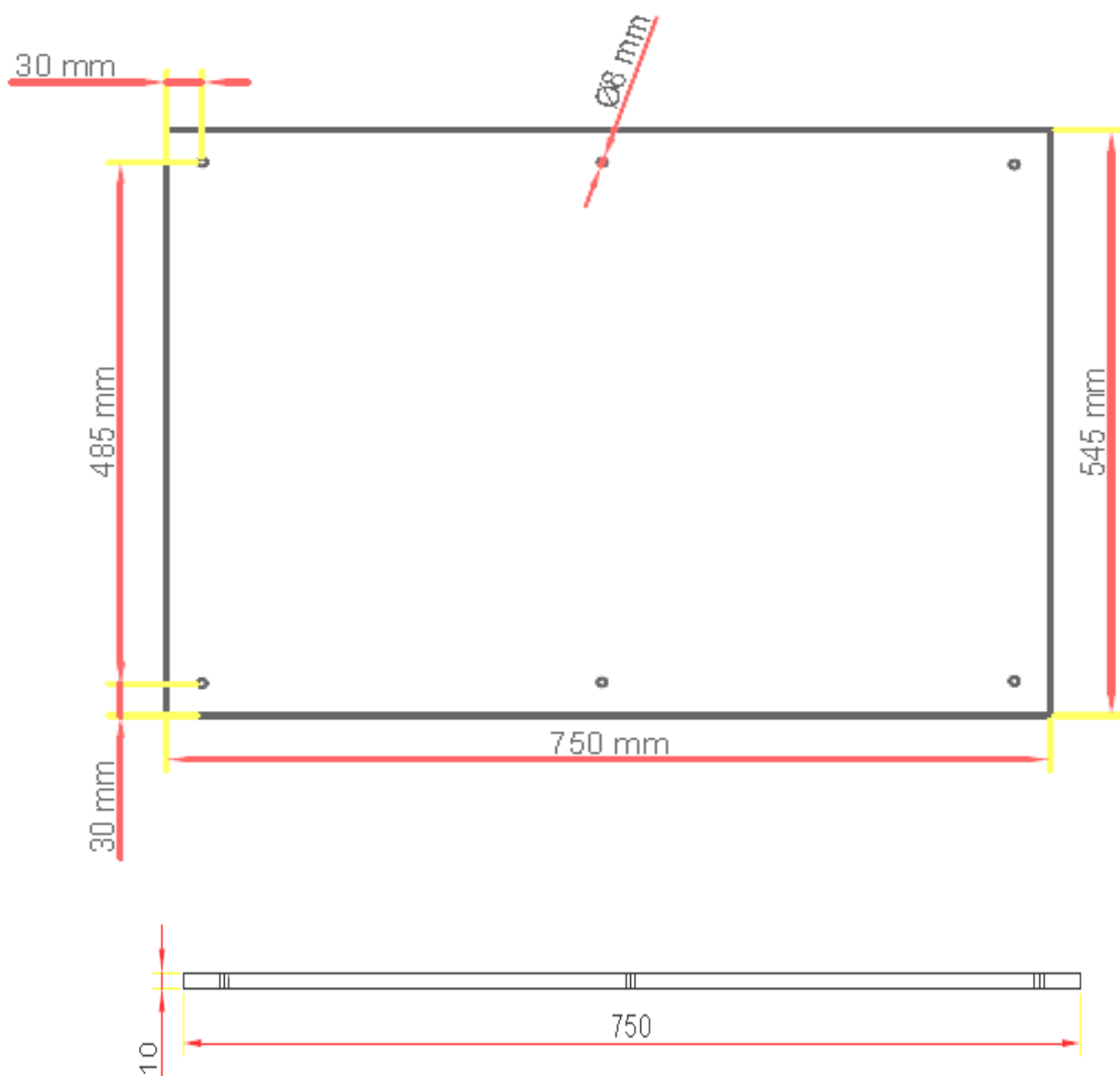
MARÇAL, R.F.M., SUSIN, A.A. **Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas**. Revista Gestão Industrial, v. 1, n. 2, 2005, 83-92.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**, 4ª ed. São Paulo, 2008.

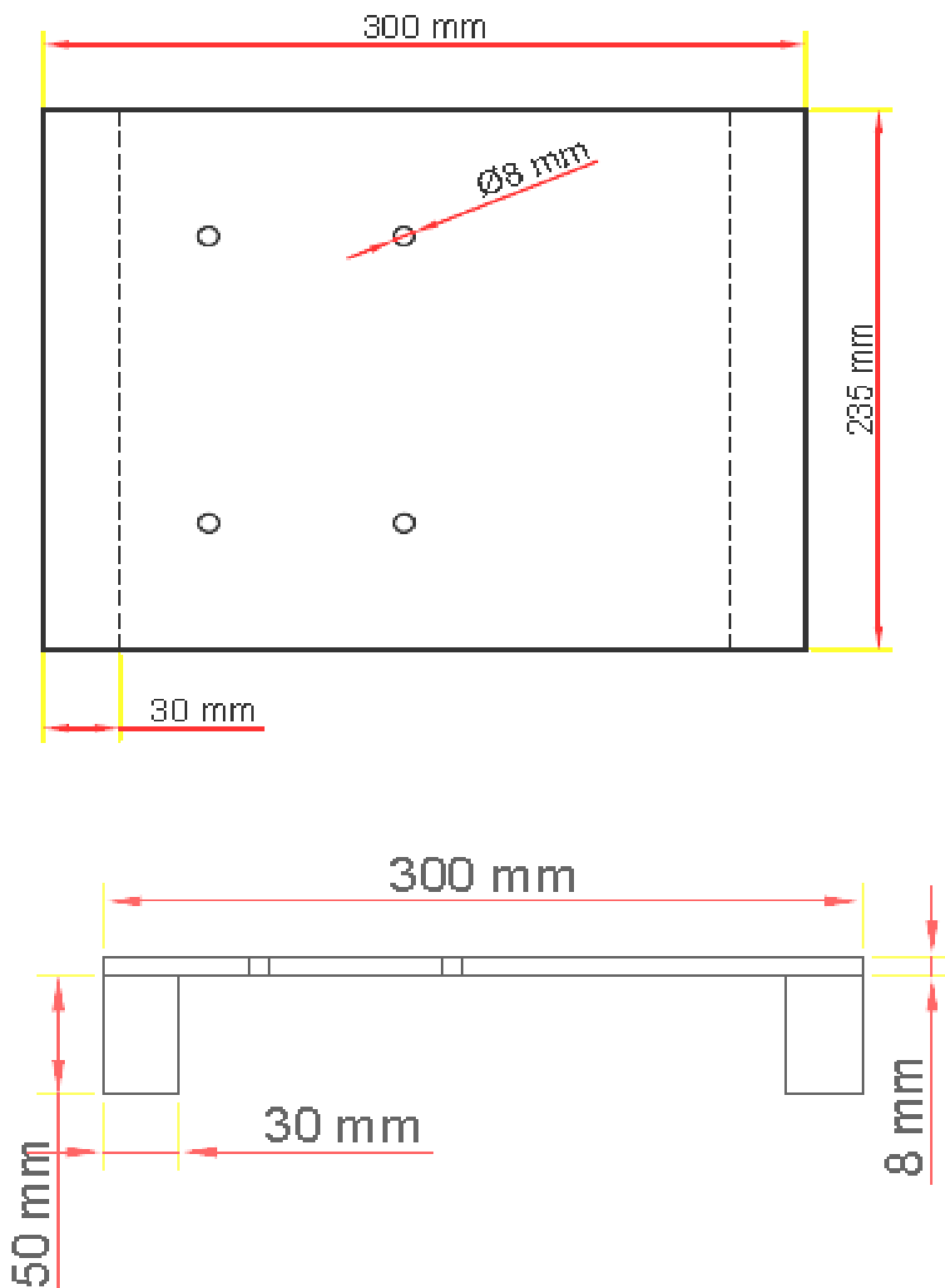
SENKO, R.; SILVA, A. A.; BORGES, J. M.; RODRIGUES, R. N.; DOS SANTOS, A. X.; HOLANDA, S. A. **Estudo do comportamento dinâmico de rotores e controle dos níveis de vibração sob desbalanceamento rotativo**. Campina Grande, PB, 2013.

SKF. **Alinhamento de polias**. Acesso em 18/06/2018. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/maintenance-products/alignment-tools/belt-alignment-tools/info.html>>.

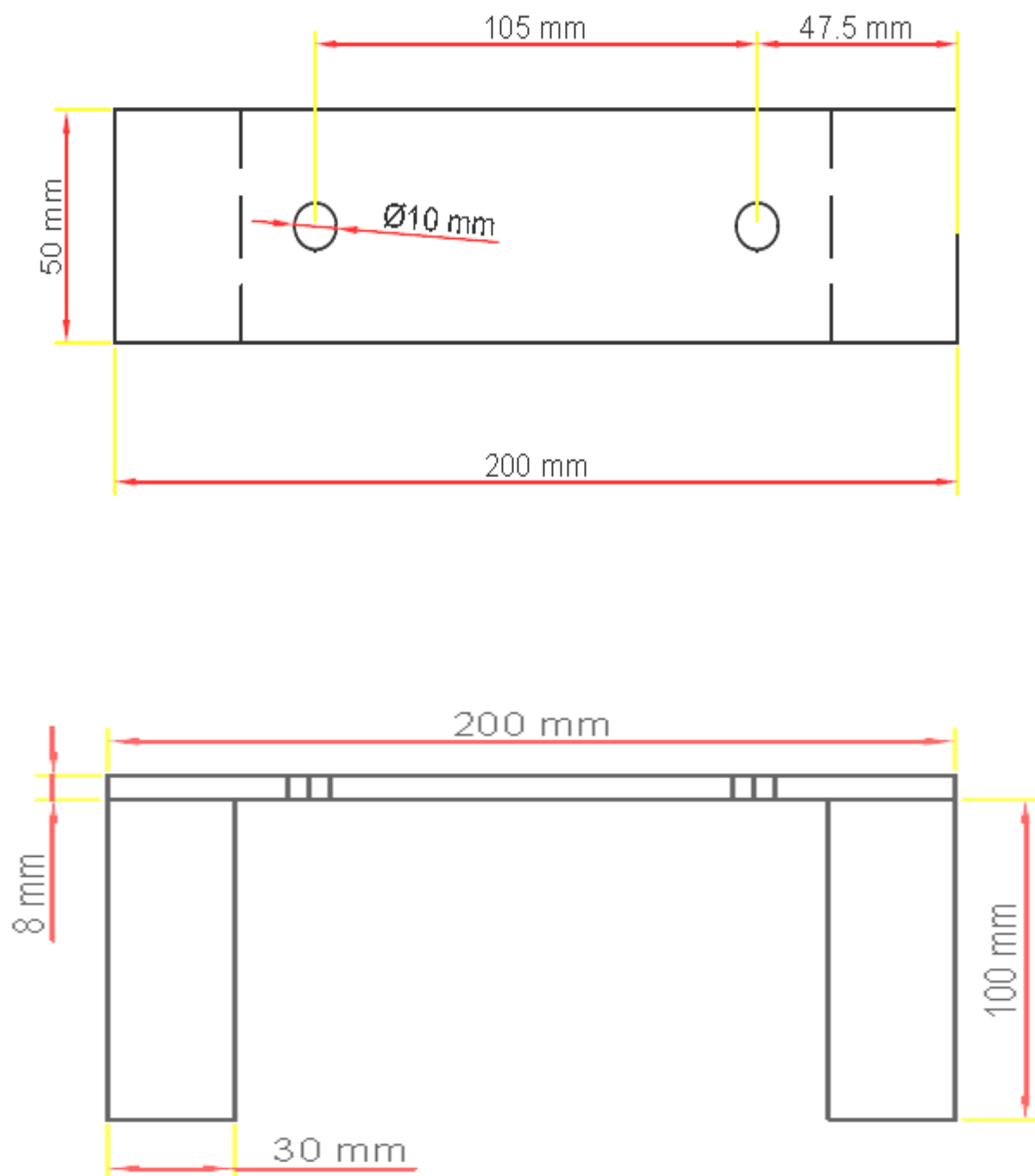
APÊNDICE I – BASE DA BANCADA



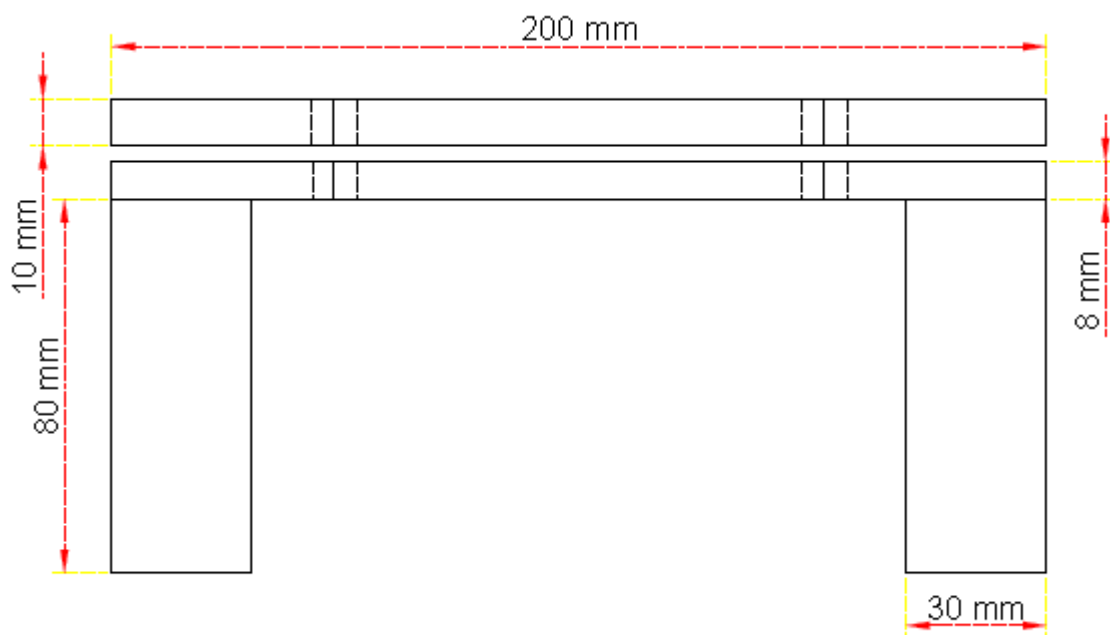
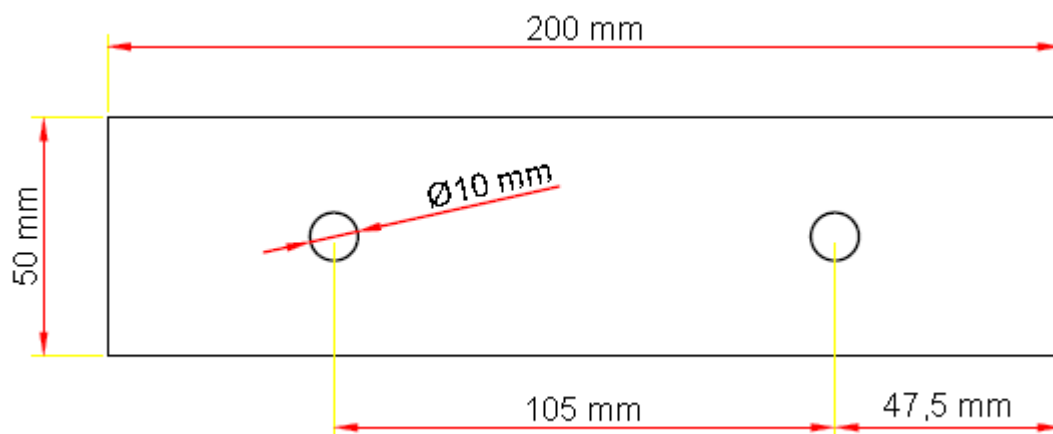
APÊNDICE II – BASE DO MOTOR



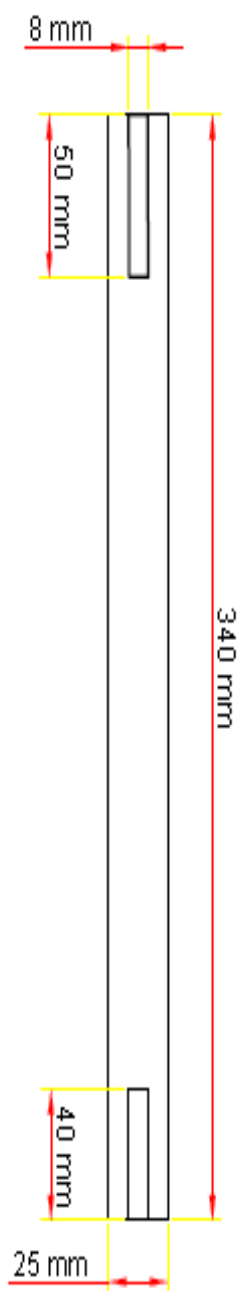
APÊNDICE III – BASE DOS MANCAIS 1 E 2



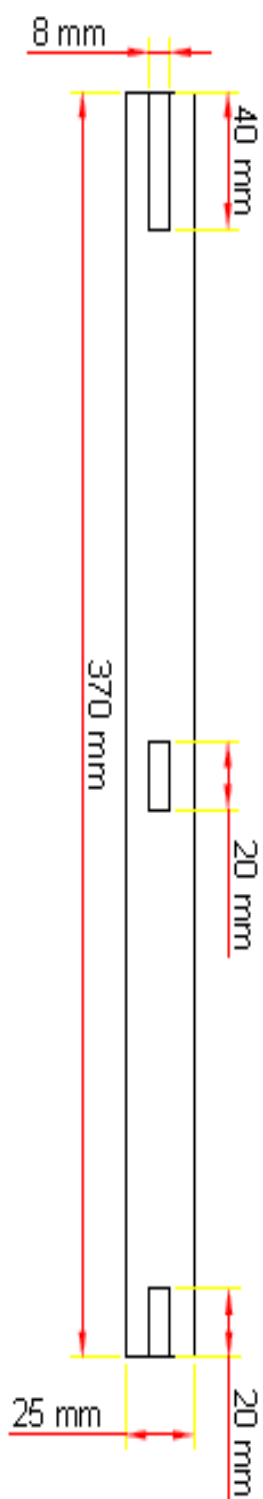
APÊNDICE IV – BASE DOS MANCAIS 3 E 4



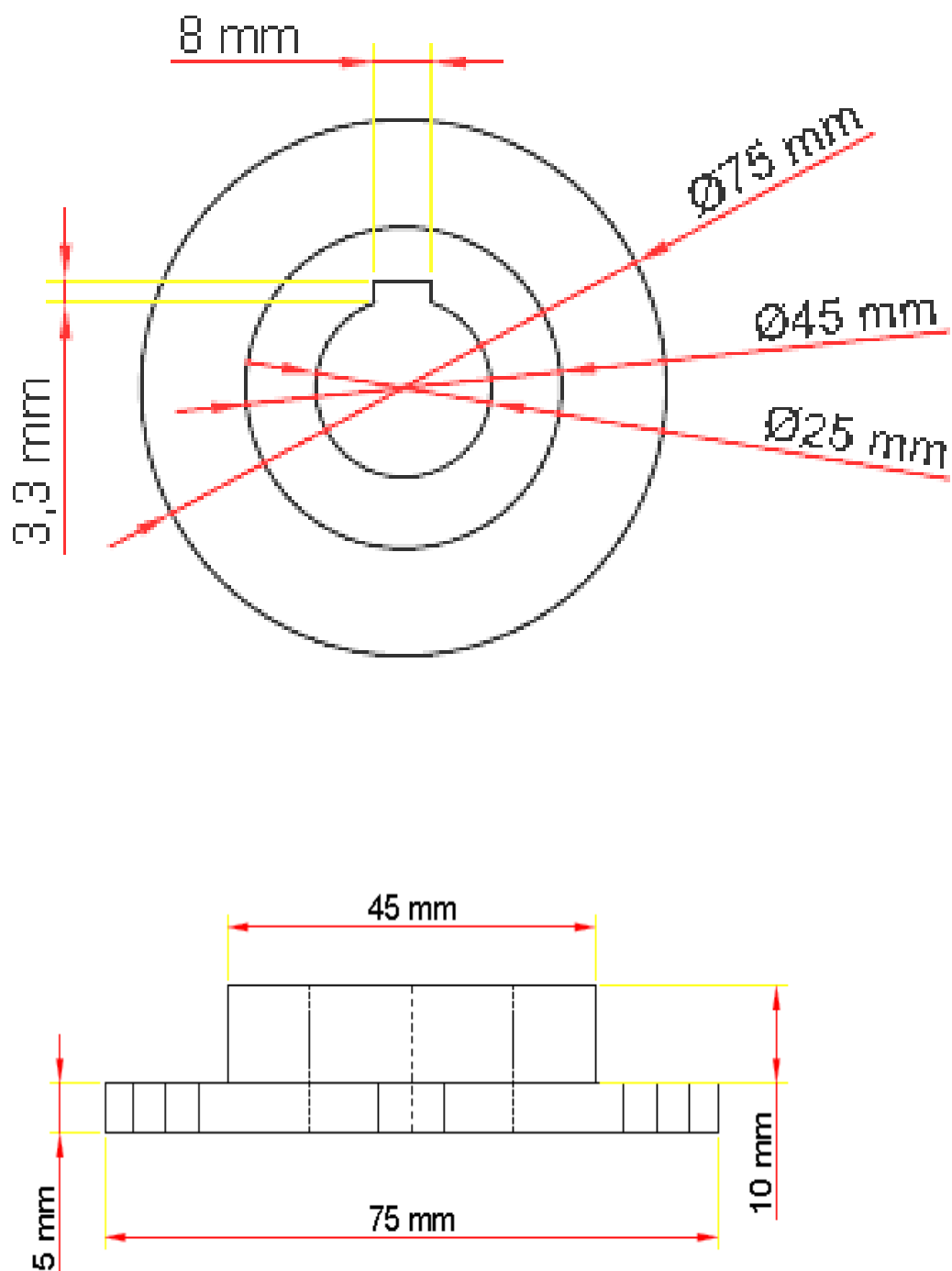
APÊNDICE V – EIXO 1



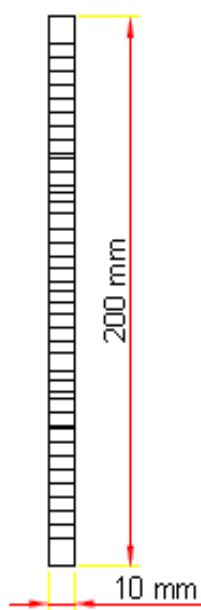
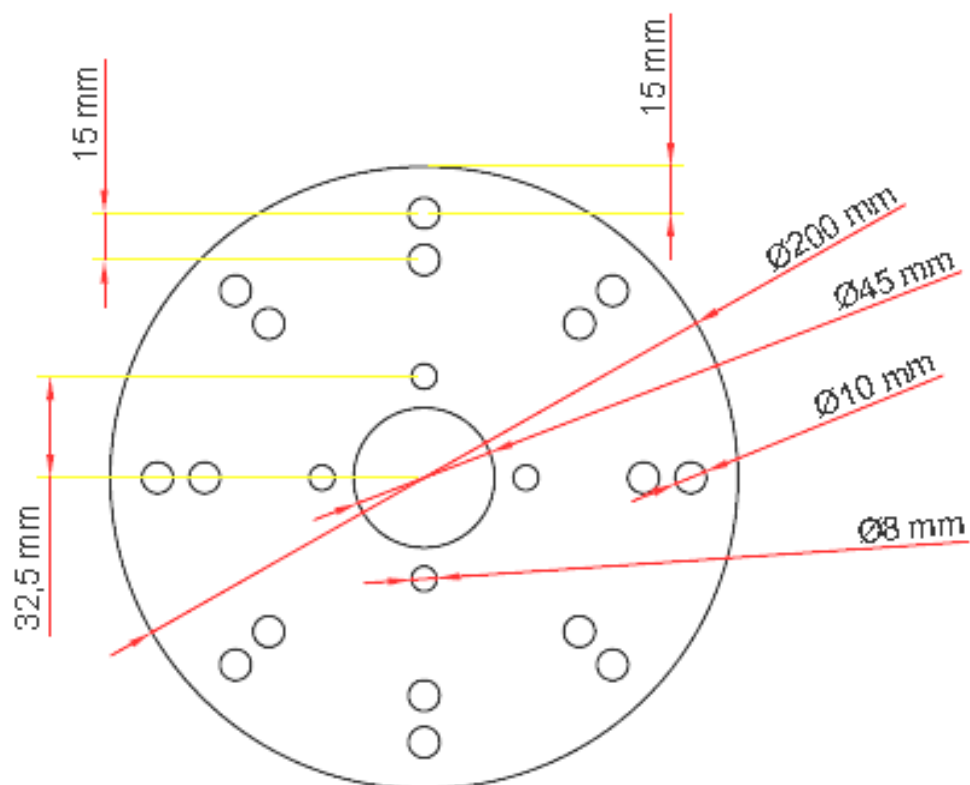
APÊNDICE VI – EIXO 2



APÊNDICE VII – BUCHA PARA DISCO DE DESBALANCEAMENTO



APÊNDICE VIII – DISCO DE DESBALANCEAMENTO



APÊNDICE IX – SUPORTE DA CAIXA DE ACIONAMENTO CHAPA 2 MM

